中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 257 ~ 288
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com





评 述 中国综合地层和时间框架专辑

中国白垩纪综合地层和时间框架

席党鹏[1], 万晓樵[1*], 李国彪[1], 李罡[2]

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008
* 通讯作者, E-mail: wanxq@cugb.edu.cn

收稿日期: 2017-10-27; 收修改稿日期: 2018-04-11; 接受日期: 2018-08-13; 网络版发表日期: 2018-09-18
国家自然科学基金项目(批准号: 41790452, 41688103, 41172037, 41272030)资助

摘要 中国白垩系分布广泛, 类型多样, 以陆相地层发育为特色, 海相及海陆交互相地层分布相对局限. 本文对中国白垩纪地层进行了总结, 完成综合地层划分与对比, 为中国白垩纪研究提供时间框架. 海相或海陆交互相沉积主要分布于西藏南部、喀喇昆仑、塔里木盆地西部、黑龙江东部及台湾东部, 以藏南分布最为完整, 浮游有孔虫化石带和菊石序列可直接与国际标准对比. 陆相沉积在中西部以河湖相红色碎屑岩为主, 在东部火山活动带常呈碎屑岩与中酸性火山岩共生, 以冀北-辽西地区和松辽盆地发育最为完整. 基于多重地层学理论, 在不同区地层对比的基础上, 以藏南和冀北-辽西、松辽盆地为标准, 完成了海相和陆相地层的综合划分与对比, 建立了中国白垩纪综合地层和时间框架. 中国白垩系研究的发展将以陆相为特色, 通过生物地层、同位素年龄、古地磁和旋回地层等多重划分与对比, 相互验证, 达到陆相与海相地层的精准对比, 为白垩纪地质事件研究和矿产资源勘查等提供可依靠的时间框架.

关键词 白垩纪, 生物地层, 年代地层, 磁性地层, 化学地层, 旋回地层, 地层对比, 中国

1 概论

白垩纪(145~66Ma)是中生代最后一个纪, 代表地质历史中典型的温室气候时期, 海平面在过去250Ma中处于高位, 发生了大火成岩省、超静磁带、大洋缺氧事件、生物演化和集群绝灭等一系列全球重大地质和生态事件, 同时也是全球烃源岩形成的主要时期, 长期以来是国际学术界研究的热点(Huber等, 2002; Leckie等, 2002; Sketon等, 2003; 王成善和胡修棉, 2005; Jenkyns, 2010; Haq, 2014; Sames等, 2016; Hay, 2017; O′Brien等, 2017). 由于高海平面的控制, 全球海相白垩纪地层发育良好, 浮游有孔虫、钙质超微和菊石等浮游生物带的建立和对比, 有力促进了海相白垩纪地层的研究, 建立了以海相地层为基础的国际地层年代表, 形成2统12阶的划分方案, 包括下白垩统贝里阿斯阶(Berriasian)、凡兰吟阶(Valanginian)、欧特里沃阶(Hauterivian)、巴列姆阶(Barremian)、阿普特阶(Aptian), 阿尔必阶(Albian)、上白垩统塞诺曼阶(Cenomanian)、土伦阶(Turonian)、科尼亚克阶(Coniacian)、桑顿阶(Santonian)、坎潘阶(Campanian)和马斯特里赫特阶(Maastrichtian) (部分阶的中译名略有差别, 为了便于国际对比, 后文统一使用英文阶名) (图 1). 目

中文引用格式: 席党鹏, 万晓樵, 李国彪, 李罡. 2019. 中国白垩纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 257–288, doi: 10.1360/N072017-00360
英文引用格式: Xi D P, Wan X Q, Li G B, Li G. 2019. Cretaceous integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 256–286, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9262-y

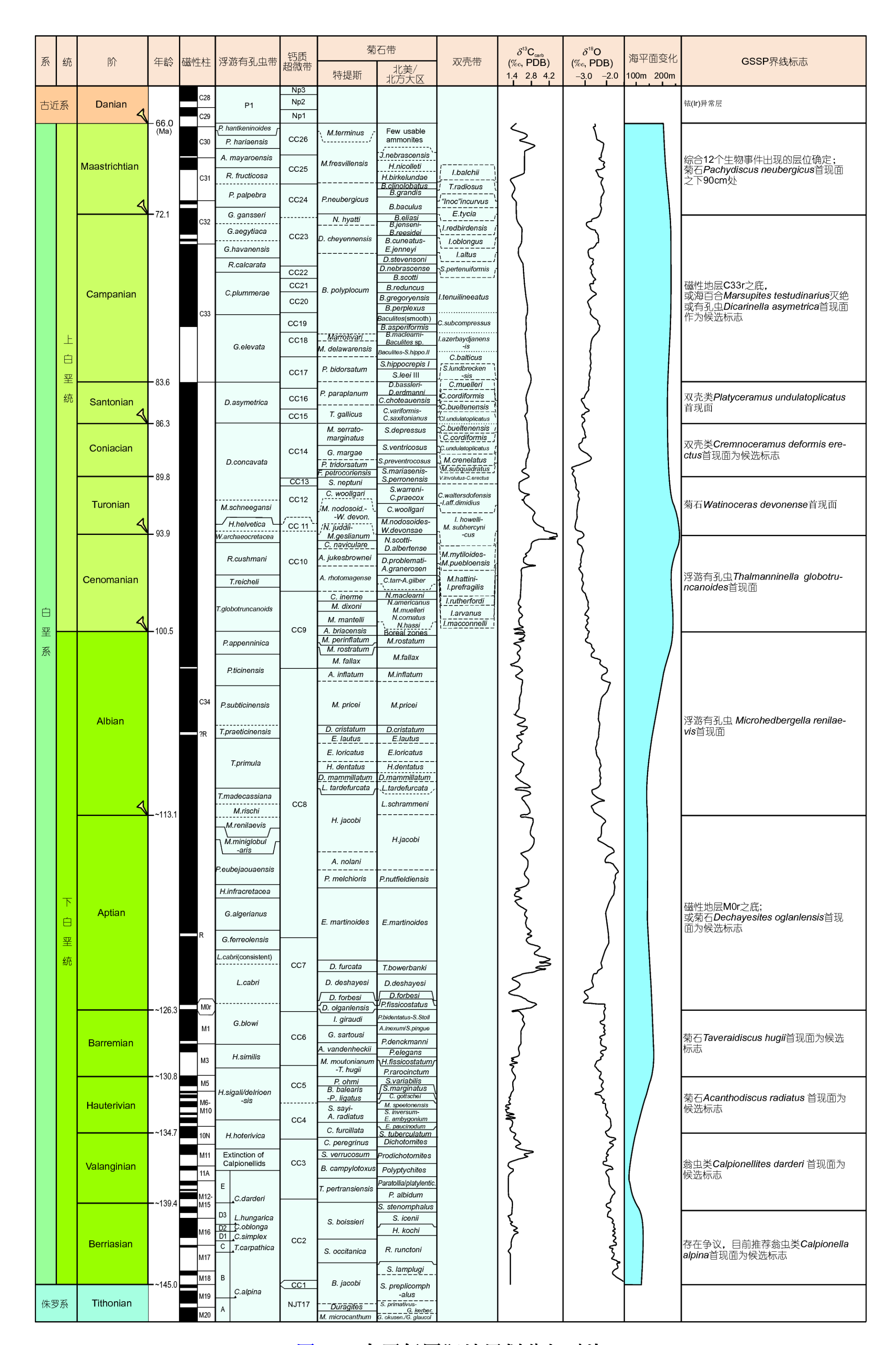


图 1　白垩纪国际地层划分与对比

国际地层和时代据Ogg和Hinnov(2012)、 Ogg等(2016); 生物带据Hardenbol等(1998)、 Ogg和Hinnov(2012)、 Haq(2014)、 Ogg等(2016); 碳同位素据Ogg和Hinnov(2012); 氧同位素转引自Haq(2014); 海平面变化引自Haq(2014). GSSP的标志: Berriasian阶参考Wimbledon (2017); Albian阶参考Kennedy等(2017); 其余各阶参考Ogg和Hinnov (2012), Ogg等 (2016)

前, 除下白垩统Albian阶、上白垩统Cenomanian阶、Turonian阶、Santonian阶和Maastrichtian阶, 其余7个阶的金钉子(GSSP)尚未确定. 白垩系底界是显生宙唯一还没有定义系级金钉子的界线(Ogg和Hinnov, 2012; Ogg等, 2016). 相比海相地层, 陆相白垩纪地层的研究程度仍相对较低.

中国白垩系分布广泛, 类型多样, 以陆相地层发育为特色, 海相地层分布相对局限(Chen, 2003; Wan等, 2007). 海相白垩系主要分布于青藏高原南部、喀喇昆仑和塔里木盆地西部. 上述地区在白垩纪属于东特提斯洋的一部分(文世宣, 1974; 郝诒纯和万晓樵, 1985; 唐天福等, 1989; Wan, 1991; Willems和Zhang, 1993; Willims等, 1995; 文世宣等, 2000; 郝诒纯等, 2001; Wan等, 2003, 2007; Wang等, 2012; Xi等, 2016). 黑龙江省东部和台湾等地区亦发育少量海相或海陆交互相白垩纪地层(沙金庚, 1990; Li和Yang, 2003; Li和Yu, 2004; Sha, 2007). 中国陆相白垩系主要分布于中生代大型内陆盆地, 以河湖相沉积和火山堆积为特征(Chen, 1983, 2003; 王五力等, 1989; 叶得泉和钟筱春, 1990; 蒋维三等, 1993; 陈丕基等, 1998; Li, 2000; Wu等, 2005; Sha, 2007; 万晓樵等, 2013). 中国东部白垩纪大地构造处于相对活跃期, 燕山运动、喜马拉雅运动等导致了中国东部一系列北北东向、北东向或近东西向展布的断陷盆地的形成, 如松辽盆地、嘉荫盆地、冀北-辽西盆地群、胶莱盆地、苏北盆地、天台盆地、信江盆地等, 形成细碎屑岩夹火山岩、火山碎屑岩及煤系地层的特色沉积建造. 中西部主要发育内陆大-中型盆地, 如准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、江汉盆地、四川盆地和楚雄盆地, 形成一套以红色碎屑为主的沉积.

中国白垩纪时期不仅发育广泛和类型丰富的沉积, 还产有世界闻名的热河生物群、松花江生物群和大量恐龙化石, 发生了著名的燕山运动、大洋缺氧事件和大洋红层等一系列重要地质事件, 也是我国油气资源和金属矿产形成的重要时期. 陆相白垩纪生物-气候-环境、东特提斯古海洋环境和东部火山-构造-成矿等方面, 长期以来是国内外学术界的研究热点(Chen, 2003; Wan等, 2007; 柳永清等, 2009; Wang等, 2013; 朱日祥等, 2011; Hu等, 2012; Zhou, 2014; Wang等, 2016). 近年来, 中国白垩纪地层的研究取得大量新进展, 特别是在东北地区建立了连续的陆相白垩纪地层序列(Sha, 2007; Wan等, 2013), 为开展陆相白垩纪地层的对比提供了标尺, 同时为研究陆相白垩纪生物、气候、环境和构造等事件提供了基础. 随着地层学的发展和研究的需要, 高精度的年代地层框架被置于重要位置, 对地层对比的精度提出了更高的要求. 本文在总结中国白垩纪地层学研究进展的基础上, 完成中国不同地区白垩纪地层的划分与对比, 建立综合的年代地层框架, 并尝试对今后中国白垩纪地层学研究的发展提出一些建议. 但是, 由于中国白垩纪盆地众多, 陆相地层划分复杂, 本文仅对具有代表性的盆地或地区的地层进行了总结.

为了方便论述中国白垩纪地层, 本文在综合郝诒纯等(1986, 2000a)、杨遵仪等(1989)、陈丕基(2000a)、Chen(2003)等不同地层分区划分方案的基础上, 结合其他资料, 将中国白垩纪地层归纳为7个大区, 即东北地层大区(I)、华北地层大区(II)、东南沿海地层大区(III)、中南地层大区(IV)、西南地层大区(V)、西北地层大区(VI)和新藏特提斯地层大区(VII)(图2). 上述7个大区的地层进一步归纳为海相、海陆交互相和陆相沉积三种类型.

2　中国白垩纪地层研究简史

1920~1950年, 一些中外地质学家对我国的白垩纪地层进行了零星和初步的调查, 多集中于“热河系”及相当的早白垩世地层. 葛利普(Grabau) (1928) 在其《中国地层》一书的中生界部分, 对我国的白垩系做了较为综合的叙述; 翁文灏以上述地层为研究基础, 创建了“燕山运动”一名(Wong, 1929). 新中国成立后, 随着大面积的区域地质调查和油气勘探工作, 白垩纪地层的研究取得了很大进展. 顾知微(1962)在《中国的侏罗系和白垩系》中, 总结了中国不同地区的白垩纪地层. 20世纪60年代开始的中国科学院青藏高原科学考察, 有力促进了海相白垩系的研究(文世宣, 1974). 陈丕基等(1982)在《中国侏罗、白垩纪地层的划分》、郝诒纯等(1982a)在《论中国非海相白垩系的划分及侏罗/白垩系的分界》中, 各自对中国白垩纪地层提出了初步的划分与对比方案; 郝诒纯等(1986)的《中国的白垩系》, 是对我国白垩纪地层的一次系统和全面总结. 20世纪80~90年代, 在基础地质调查、科学考察、油气勘探和国际地质对比计划(IGCP)等推动下, 对中国白垩纪地层和古生物开展了广泛和深入

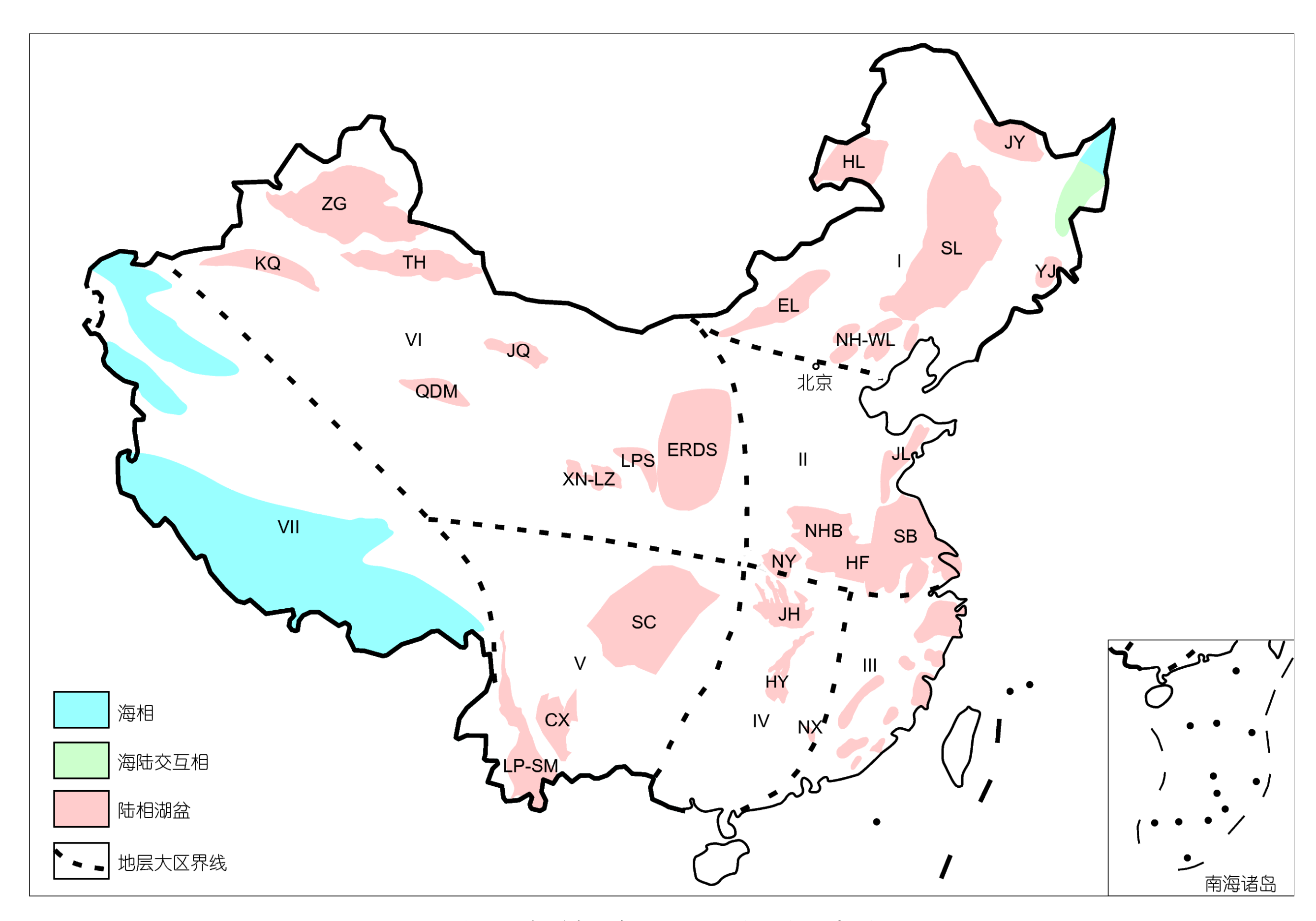


图 2　中国白垩纪地层区划和沉积示意图

据陈丕基(2000a)、Chen(2003)、Wan等(2007)、曹珂(2013)、Li和Matsuoka(2015)修改. 藏南在整个白垩纪为海相环境, 塔里木盆地西部、喀喇昆仑在晚白垩世为海相环境, 黑龙江东部在早白垩世早中期为海陆过渡环境. I–东北地层大区; II–华北地层大区; III–东南沿海地层大区; IV–中南地层大区; V–西南地层大区; VI–西北地层大区; VII–新藏特提斯地层大区. BH–渤海湾盆地; CX–楚雄盆地; HL–海拉尔盆地; HF–合肥盆地; JH–江汉盆地; JL–胶莱盆地; JQ–酒泉盆地; JY–嘉荫盆地; KQ–库车盆地; LP–六盘山盆地; LP-SM–兰坪-思茅盆地; NH-WL–冀北-辽西地区系列盆地; NHB–南华北盆地; NX–南雄盆地; NY–南阳盆地; QDM–柴达木盆地; SB–苏北盆地; SC–四川盆地; SL–松辽盆地; TH–吐哈盆地; XN-LZ–西宁-兰州盆地; ZG–准噶尔盆地

的研究, 陆续完成了西藏地区、塔里木盆地西部、中国北方含油气区、辽西地区、南方各主要盆地等不同区域的白垩纪地层和主要古生物门类的总结, 陆续出版了大量相应的专著和论文(如郝诒纯等, 1982b, 2001; 万晓樵, 1987; 陈丕基, 1989; 徐钰林等, 1990; 叶得泉和钟筱春, 1990; Chen等, 1998; Ji等, 1998). 文世宣等(2000)和陈丕基(2000a)在《中国地层研究二十年》专著中, 分别对中国1979~1999的海相和陆相白垩纪地层研究进展进行了综述; 郝诒纯等(2000a)在《中国地层典: 白垩系》完成了中国白垩系多重地层划分与对比.

进入21世纪, 特别是近10年, 随着磁性地层、旋回地层、化学地层以及同位素测年技术方法的发展和应用, 白垩纪地层的研究从传统的生物地层学向综合地层学的方向发展. 与此同时, 白垩纪生物、气候、环境和构造事件等方面的深入研究对地层划分与对比的精度提出了更高的要求, 客观上推动了白垩纪地层的发展. 2000年开始的全国陆相建阶工作, 亦推动了中国陆相白垩纪地层的研究(万晓樵等, 2013; 全国地层委员会, 2018). “地时-中国” (Earth Time-CN)计划于2013年产生, 进一步提高中国高精度地质年代学和定量地层学的研究水平和国际影响力(万晓樵等, 2014). 这一时期, 我国在热河生物群、大洋红层与缺氧事件、松辽盆地科学钻探、陆相白垩纪气候和中国白垩

纪火山-构造事件等方面取得大量新进展(Zhou等, 2003; Hu等, 2005; Wang等, 2005, 2013; Wu et al., 2005; Sha, 2007; Hu等, 2012; Wan等, Zhou, 2014), 对一些重要化石门类的生物地层学进行了深入研究和总结(如宋之琛和尚玉珂, 2000; 侯佑堂等, 2002; 侯佑堂和勾韵娴, 2007; 叶得泉等, 2002; 陈丕基等, 2012; 邓胜徽等, 2012; 程金辉和何承全, 2012; 潘华璋, 2012; 阴家润, 2016), 磁性地层学、旋回地层学和化学地层学等手段也广泛应用于白垩纪地层的研究中(如Zhu等, 2004; Li等, 2006; Deng等, 2013; Wu等, 2013a, 2014; Li等, 2017; Liu等, 2017), 对全国或区域性的白垩纪地层亦做了阶段性总结(如Chen等, 2003; 王启飞和陈丕基, 2005; Sha, 2007; Wan等, 2007; 丁保良等, 2010; 姜宝玉等, 2010; 沙金庚和Lucas, 2012; 曹珂, 2013; Xi等, 2016; 李祥辉等, 2018), 有力促进了中国白垩纪地层学的研究.

3　综合年代地层框架

中国白垩纪地层分布广泛, 海相白垩系以喜马拉雅地区发育最为完整, 陆相白垩系以东北地区发育最为完整(Chen, 2003; Wan等, 2007). 近年来, 中国白垩纪的研究在生物地层、年代地层、化学地层、磁性地层和重要生物群等方面取得进展, 为建立综合年代地层框架提供了基础. 生物地层方面, 万晓樵等(2007)、阴家润(2016)分别对西藏南部的有孔虫、菊石进行了总结, 宋之琛和尚玉珂(2000)、侯佑堂等(2002)、侯佑堂和勾韵娴(2007)、程金辉和何承全(2012)、陈丕基(2012)、邓胜徽等(2012)、潘华璋(2012)等分别对中国白垩纪的介形类、叶肢介、植物、孢粉等重要门类化石进行了总结. 其中热河生物群、松科1井和东特提斯白垩纪地质事件等研究产生了较大影响(Zhou等, 2003; Sha, 2007; Hu等, 2012; Wan等, 2013; Wang等, 2013; Zhou, 2014). 化学地层方面, 建立了西藏特提斯晚白垩世碳同位素演化曲线, 据此识别了大洋缺氧事件(OAE)(Li X等, 2006, 2016), 开展了中国东北地区松辽盆地晚白垩世介形类壳体碳氧同位素和辽西义县组有机碳同位素地层的研究(Chamberlain等, 2013; Zhang X等, 2016), 分析了塔里木盆地和南雄盆地白垩纪-古近纪界线(K/Pg)的碳氧同位素和铱元素(郝诒纯等, 2001; 赵资奎等, 2009, 2017). 磁性地层是地层对比的重要手段, 松辽盆地已经建立了完整的晚白垩世磁性地层, 辽西地区开展了义县组磁性地层学研究(Zhu等, 2007; Deng等, 2013), 对塔里木盆地、六盘山盆地、兰州盆地和浙江等地区的白垩纪地层也开展了初步的磁性地层研究(彭守涛等, 2005; 唐玉虎, 2008; 戴霜等, 2009; 丁保良等, 2010). 我国东部地区白垩纪火山活动频繁, 发育大量火山岩或火山灰夹层, 随着Ar-Ar测年和锆石U-Pb测年技术的发展, 在放射性同位素测年方面取得了大量新进展(如He等, 2004, 2006a, 2006b, 2012; 王非等, 2010; Wang等, 2016). 旋回地层是建立高分辨率年代标尺的有效手段, 目前我国已经建立了松辽盆地晚白垩世天文年代标尺(Wu等, 2013a, 2014), 在辽西和甘肃酒泉盆地等也开展了初步的探索(Wu等, 2013b; Liu等, 2017).

3.1　海相地层

喜马拉雅地区海相地层发育最为完整, 以陆棚和上陆坡环境沉积为主, 为中国白垩纪海相地层的代表. 典型剖面为西藏聂拉木(主要为白垩系下部)和岗巴(主要为白垩系中-上部)地区的剖面(徐钰林等, 1990; 万晓樵等, 2000). 结合近期研究, 本文自下而上进一步将其划分为古错村组(Tithonian-Hauterivian)、岗巴东山组(Barremian-Aptian)、察且拉组(Albian)、冷青热组(Cenomanian-Turonian下部)、岗巴村口组(Turonian中部-Campanian下部)和宗山组(Campanian中部-Maastrichtian)(图3). 其中, 古错村组典型剖面位于聂拉木古错, 其余各组均以岗巴地区剖面为代表.

喜马拉雅地区白垩纪浮游有孔虫和菊石化石研究较为深入, 建立了完整的生物地层序列(图3). 自Hauterivian阶至白垩系顶部, 可识别27个浮游有孔虫化石带. 除顶部的*A. mayaroensis*和*G. gansseri* 两个带产自康马-隆子的宗卓组外, 其余25个带均发育于北喜马拉雅地层区的岗巴-定日一带. 本文综合多年成果, 细化了连续的浮游有孔虫化石带, 达到了与国际地层的精细对比. 菊石化石在喜马拉雅地区发育良好. 除Turonian-Santonian和Maastrichtian两个层段未见菊石, 其余地层均发现具有时代意义的化石. 据此, 阴家润(2016)建立了不同时代的菊石组合(动物群), 图3中Berriasian-Hauterivian期菊石代表产自江孜-浪卡子一带, 其上化石均发育于岗巴-聂拉木地区. 除了生物地层, Li等(2006)建立了藏南地区晚白垩世碳同位素曲线(图

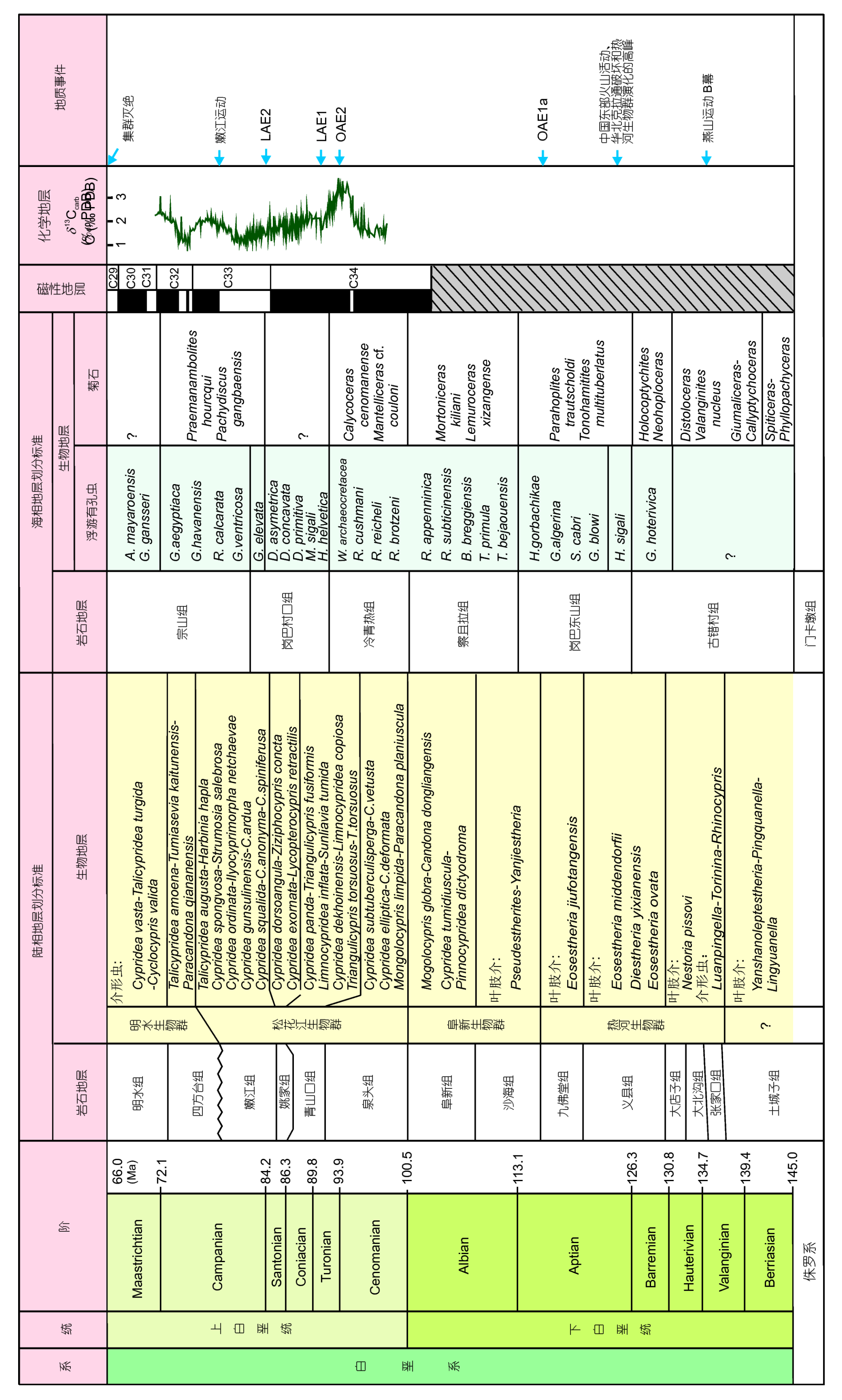


图 3　中国白垩纪综合年代地层框架

国际阶据国际年代地层表(2016); 陆相地层划分标准: 下白垩统据冀北辽西地层序列, 上白垩统据松辽盆地地层序列; 海相地层划分标准据喜马拉雅地层序列; 菊石地层据阴家润(2016); 磁性地层据Deng等(2013); 化学地层据Li等(2006); OAE, 大洋缺氧事件; LAE, 松辽盆地湖泊缺氧事件

3), Li 等(2017)开展了藏南OAE2的旋回地层学研究.

3.2 陆相地层

陆相地层划分与对比是地层学研究中的难题. 中国拥有众多白垩纪陆相沉积湖盆, 尤其是东北地区发育了以松辽、嘉荫盆地为主的大型沉积盆地, 以及冀北、辽西和内蒙古东部盛产热河生物群的火山-沉积盆地, 构成了中国陆相白垩系的典范. 冀北、辽西地区的下白垩统自下而上被划分为8个地层单元: 土城子组(上部)、张家口组、大北沟组、大店子组、义县组、九佛堂组、沙海组和阜新组; 松辽盆地上白垩统自下而上发育6个组: 泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组.

3.2.1 陆相下白垩统

中国东北地区陆相下白垩统十分发育,保存也较为完整, 产有世界罕见的热河生物群. 冀北和辽西地区早白垩世地层发育最为良好, 沉积了一套以火山-湖相沉积为主的地层, 发育多期火山岩系, 保存了精美的化石(陈丕基和金帆, 1999; 张弥曼等, 2001; Zhou等, 2003; 季强等, 2004; 田树刚等, 2004; Sha, 2007; Zhou, 2014), 为系统开展早白垩世地层的研究提供了理想条件.

土城子组(在冀北称后城组)的同位素年龄主要在156~137Ma之间(Swisher等, 2001; Davis, 2005; 孙立新等, 2007), 土城子组三段见较为丰富的白垩纪孢粉(林妙琴等, 2016), 因此可将土城子组上部归于白垩纪. 张家口组地层可能存在穿时性, 其中在滦平盆地的锆石U-Pb年龄约为136~135Ma(牛宝贵等, 2003; 张宏等, 2005), 在凌源盆地约为132~129Ma(张宏等, 2005). 大北沟组有广义和狭义之分, 广义的"大北沟组"系1975年河北第二区测队建立, 为一套湖相碎屑为主的沉积, 置于张家口组和西瓜园组之间; 王思恩(1990)将滦平盆地原"大北沟组"进一步分解为下部的大北沟组(狭义)和上部的大店子组. 考虑到大北沟组和大店子组在滦平盆地连续分布, 本文暂时采用后一种划分方案. 滦平盆地大北沟组中部SHRIMP锆石U-Pb年龄为130或133Ma(柳永清等, 2003), 丰宁地区大北沟组(广义)顶部的火山岩^{40}Ar/^{39}Ar年龄为(130.7±0.7)Ma(He等, 2006a), 大店子组的化石具有早期热河生物群的特征, 通常置于大北沟组和西瓜园组/义县组之间(田树刚等, 2004), 但关于该组的时代及与大北沟组、义县组的划分与对比关系尚需进一步的研究. 义县组主要含化石层底部的年龄为125Ma左右(Swisher等, 1999, 2001; 王松山等, 2001; He等, 2006b; Chang等, 2017). 虽然将125Ma左右作为含热河生物群化石的火山-沉积层底界的年龄已经被普遍接受, 但该组下部地层的时代和归属还存在争议. 传统的义县组定义还包括下部火山岩, 而底部火山岩地层的年龄有(129.7±0.5)Ma的报道(Chang等, 2009). 九佛堂组下部沉积夹层中火山灰获得了(120.3±0.7)Ma和(122.1±0.5)Ma的^{40}Ar/^{39}Ar年龄(He等, 2004; Chang等, 2009). 内蒙古太博齐 九佛堂组之上的玄武岩^{40}Ar/^{39}Ar年龄为(110±0.52)Ma, 约束了该组年龄的上限(Eberth等, 1993). 义县组同位素年龄的结果与无脊椎动物(如双壳类、介形类)、脊椎动物和孢粉等的结论一致(汪筱林等, 2000; Li和Batten, 2007; Sha, 2007; Xu等, 2010; 周忠和和王原, 2010; Wang Y Q等, 2015).

义县组含化石层的磁性地层与火山岩年龄研究取得了比较一致的结果. 潘永信等(2001)结合已有的年代和对北票四合屯剖面古地磁学研究, 将该剖面含化石层段的古地磁极性年龄定为早白垩世Barremian期的M3n; Zhu等(2007)对四合屯化石剖面火山岩的古地磁和^{40}Ar/^{39}Ar年代学研究表明, 含化石沉积层之下火山岩和上覆火山岩年龄大约为125.7~124.2Ma, 该结果与旋回地层学的研究结果一致(Wu等, 2013b). He等(2008)对辽宁义县马神庙-砖城子剖面火山熔岩进行了古地磁与年代学综合研究, 对Aptian阶底界(即M0r开始)年龄进行了重新确定, 平均年龄为(121.2±0.5)Ma.

沙海组、阜新组和孙家湾组目前缺乏直接的同位素年龄证据, 主要依据生物地层对比研究结果. 本文综合阜新盆地植物、孢粉组合和叶肢介与松辽盆地和延吉盆地等地区的对比结果, 认为沙海组和阜新组的时代为Aptian晚期-Albian期(邓胜徽等, 2012; Li G, 2016). 孙家湾组由于缺乏化石证据, 时代属于早白垩世晚期还是晚白垩世早期存在争议, 考虑到孙家湾组和泉头组在区域地层上的对比关系, 目前暂且将其置于晚白垩世Cenomanian期(万晓樵等, 2013).

3.2.2 陆相上白垩统

近年来, 松辽盆地上白垩统研究取得了显著进展. 松辽盆地岩层出露很差, 松科1井连续岩心为研究提供了理想材料. 本文结合钻井资料及地表剖面, 通过磁性

地层、旋回地层、同位素年代地层、生物地层、定量地层学和岩石地层的研究与探索，实现了多重地层划分，完成了松辽盆地晚白垩世陆相地层与海相地层对比. 首先建立多门类生物地层和磁性地层序列, 利用高精度同位素测年标定不同阶段地层的年龄, 进而通过旋回地层学研究建立天文年代标尺, 最终以多重地层学研究手段建立中国晚白垩世陆相高精度年代地层学标准.

生物地层序列为地层划分的基础. 松科1井保存有大量、连续分布的微体化石, 许多研究者利用松科1井岩心完成了微体古生物学研究，获得了以介形类、有孔虫、孢粉和轮藻为主的生物地层划分结果(席党鹏等, 2010; Li等, 2011; Scott等, 2012; Xi等, 2012; 李莎等, 2013; Wan等, 2013; Qu等, 2014; Zhao等, 2014). 在生物地层的基础上，进一步开展了磁性地层、同位素年代地层和旋回地层学研究. Deng等(2013)利用连续的岩心记录，建立了松科1井的磁性地层格架. He等(2012)基于连续的岩心资料，对松科1井的斑脱岩率先开展了SIMS 锆石U-Pb定年，同位素年龄分别为(91.4±0.5)Ma (青1段底), (90.1±0.6)Ma (青1段顶), (90.4±0.4) Ma (青2+3段底), (83.7±0.5)Ma(嫩2段底). Wang等(2016)利用CA-ID-TIMS锆石U-Pb定年，对松科1井南孔四层火山灰样品再次测试，4件样品年龄分别是(91.886±0.033/0.058/0.11)、(90.974±0.042/0.062/0.12)、 (90.536±0.039/0.062/0.12)和(83.269±0.044/0.063/0.11)Ma. 最近, Xi等(2018)在松辽盆地X1-4井嫩江组一段底部获得(83.5±0.6)Ma的SIMS锆石U-Pb年龄. Wu等(2013a, 2014)以锆石U-Pb年龄和磁性地层学年代格架为约束，建立了分辨率为0.4Myr的连续天文年代标尺(图4).

综合上述多学科的研究结果，本文完善了包括磁性地层、天文地层、同位素年代地层、生物地层和定量地层学为主的中国晚白垩世陆相年代地层的标准, 使其达到与国际地层格架的对比(图4). 松科1井不仅为中国和全球提供了陆相晚白垩世综合地层划分与对比的标准, 其年代地层格架亦将对国际地层表做出贡献.

3.2.3 陆相建阶和生物地层对比

中国白垩系以陆相地层发育为特色，完成陆相地层划分、赋予可与海相地层对比的年代框架是白垩纪研究的基础. 东北地区不仅发育有完整的陆相白垩纪地层，还产有丰富的介形虫、叶肢介、轮藻、孢粉、浮游植物、昆虫、植物、双壳类、腹足类、鱼类、爬行类、鸟类和哺乳类等化石，是建立中国白垩纪陆相地层序列和化石组合序列的标准(万晓樵等, 2013). 万晓樵等(2013)和全国地层委员会(2018)基于冀北-辽西地区和松辽盆地的地层序列和化石组合序列，将下白垩统划分为冀北阶、热河阶和辽西阶，上白垩统划分为农安阶、松花江阶和绥化阶(图5、6).

本文以中国东北白垩纪地层和主要门类化石组合为基础, 基于国际地层年代框架, 建立了中国陆相白垩纪生物地层序列(图 5、6). 根据中国东北地区生物群与面貌，从早到晚可划分为(燕辽生物群/热河生物群)过渡生物群、热河生物群、阜新生物群、松花江生物群和明水生物群(嘉荫生物群)(图3). 冀北阶相当于Valanginian-Hauterivian阶，发育以叶肢介化石*Nestoria pissovi*为代表的早期热河生物群; 热河阶相当于Barremian阶-Aptian阶下部，发育中期热河生物群; 辽西阶相当于Aptian阶上部-Albian阶, 发育阜新生物群, 同时具有热河生物群晚期的特征; 农安阶相当于Cenomanian阶-Santonian阶下部，发育早期松花江生物群; 松花江阶相当于Santonian阶上部-Campanian阶下部，发育晚期松花江生物群; 绥化阶相当于Campanian阶上部-Maastrichtian阶，发育明水生物群. 需要提及的是，原来的陆相建阶工作中，将土城子组的时代归为晚侏罗世，对应于三宝营阶(王五力等, 2004; 王思恩等, 2013), 但新的同位素年龄和生物地层显示土城子组上部的时代为早白垩世，生物面貌属于热河生物群和燕辽生物群的过渡类型(林妙琴等, 2016; 万晓樵等, 2016; Zhou和Wang, 2017). 因此，本文认为土城子组上部与国际Berriasian阶相对应，有必要进一步确定陆相地层相应的阶和生物标志.

中国陆相白垩系建阶工作基于东北地区连续的地层序列和丰富的化石记录，以生物群的演化阶段为划分依据，为开展陆相地层划分与对比的工作提供了新思路. 上述生物群在中国北方和东部可以广泛进行对比，如东南地区的建德生物群、永康生物群、衢江生物群和同乡期化石组合(丁保良等, 2010), 可分别与东北地区的上述4个生物群进行对比. 此外, 叶肢介、介形虫、轮藻、孢粉、植物、双壳类、腹足类和爬行类组合, 分别可进行大区域的地层对比(侯佑堂等, 2002; 侯佑堂和勾韵娴, 2007; Sha, 2007; Li等, 2011; 陈金辉和何承全, 2012; 陈丕基, 2012; 邓胜徽等, 2012; 潘华

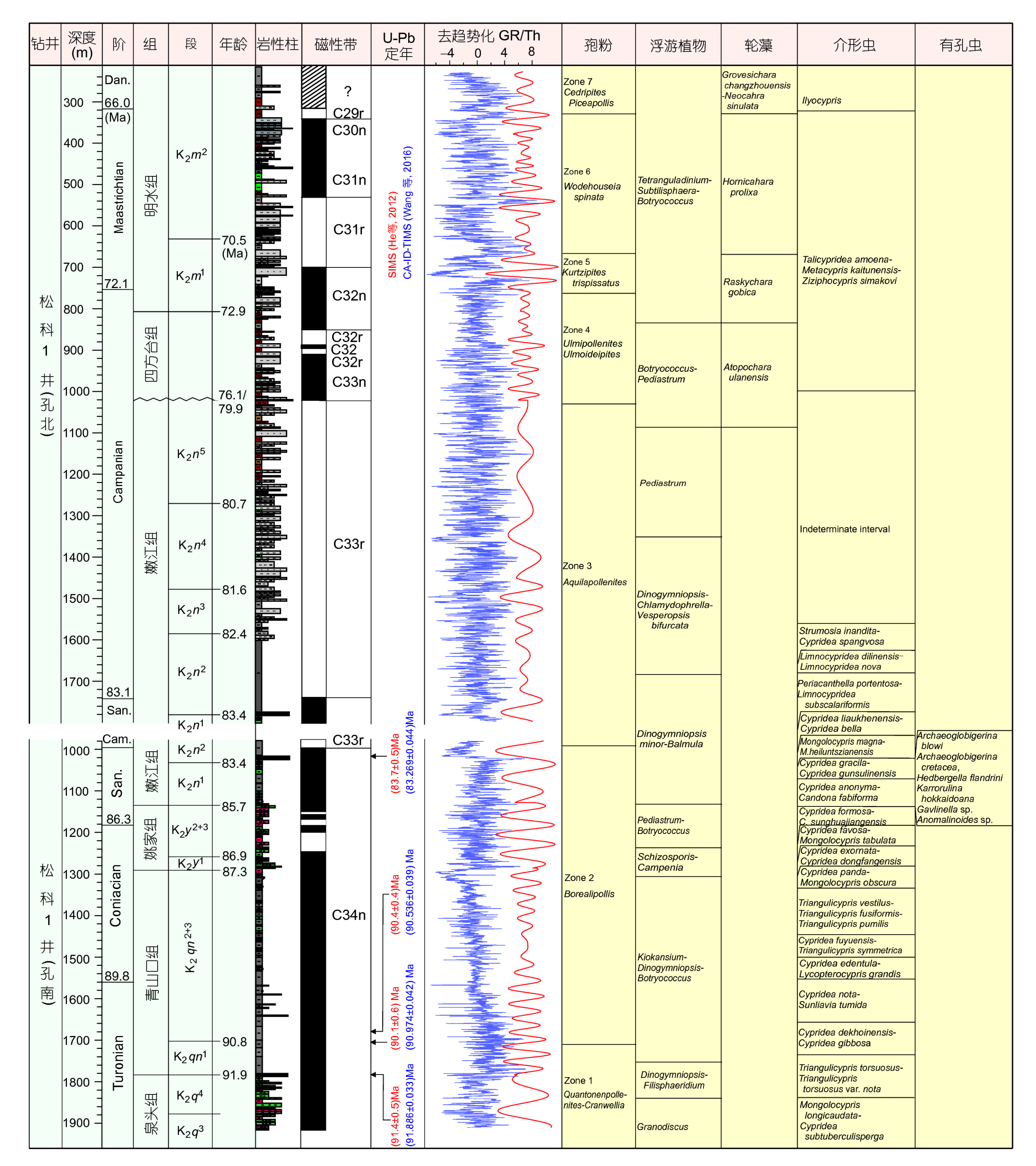


图 4　松科1井晚白垩世多重年代地层划分及其与国际年代地层的对比

蓝色曲线代表了北孔去趋势化Th测井曲线、南孔去趋势化GR曲线(姚家组为Th曲线)红色曲线代表由GR/Th曲线中识别出的40.5万年长偏心率旋回. 年龄据Wan等(2013); 磁性带据Deng等(2013); U-Pb定年据He等(2012)(TIMS定年, 红色)和Wang等(2016) (CA-ID-TIMS定年, 蓝色); 去趋势化GR/Th及其40万年滤波结果据Wu等(2013a, 2014); 松辽盆地南、北孔的衔接以嫩江组二段底部的油页岩为标志

统	阶 国际阶	阶 陆相阶	生物群	组	化石组合序列 孢粉	植物	双壳类	腹足类	叶肢介	介形虫	昆虫	鱼类	恐龙和鸟类
下白垩统	Albian	辽西阶	阜新生物群	阜新组	*Deltoidospora-Cicatricosisporites-Appendicisporites* 组合	*Ctenis lyrata-Chilini* 组合	*Arguniella liaoxiensis-Musculiopsis yixianensis* 组合		*Pseudestherites-Yanjiestheria-Diestheria-Eosestheria-Orthestheria* 组合	*Mongolocypris globra-Candona dongliangensis-Eoparacandona* 组合	*Parahaglopsis* 动物群	*Haizhoulepis changi* 动物群	*Changpeipus carbonicus* 动物群
					Pilosisporites-Appendicisporites-Triporoletes 组合	*Ruffordia-Dryopterit* 组合				*C. tumidiuscula-Pinnocypridea dictyodroma-Mantelliana papulosa* 组合			
	Aptian		116Ma	沙海组	*Liaoxisporis-Pilosisporites-Classopollis* 组合	*Acanthopteris-Ginkgo coriace* 组合	*Margaritifera (Mengyinaia) mengyinensis-Nakamuranaia subrotunda* 组合	*Campeloma liaoningensis-C. tani* 组合		*C. ihsienensis-Limnocypridea qinghemenensis-Protocypretta subglobosa* 组合		*Palaeonisciformes* indet.-*Jinanichthys longicephalus-Paralycoptera-Teleostei* indet 动物群	*Megalosauridae* 动物群
		热河阶	热河生物群	九佛堂组	*Piceaepollenites-Cicatricosisporites-Concavissimisporites* 组合			*Eozaptychius fusoides-Campeloma tulongshanensis* 组合	*Eosestheria fuxinensis* 生物带	*C. kosculensis-C. casta-Limnocypridea abscondidd-Jungarica* 组合	*Ephemeropsis* 动物群	*Lycoptera* 动物群	*Cathayornis-Chaoyangia* 动物群
									Eosestheria jiufotangensis 生物带	*C. veridica - C. trispinosa-C. acutiuscula* 组合			
	Barremian		130	义县组	*Densoisporites-Cicatricosisporites-Aequitriradites* 组合	Jehol 植物群	*Arguniella yanshanensis-Sphaerium anderssoni* 组合	*Probeicalia vitimuensis-Ptycostylus-Amplovalvata-Gyraulus* 组合	*E. middenforfii* 生物带	*C. veridica arquata-C. Jingangshanensis-C. Zaocishanensis* 组合			*Sinosauropteryx-Confuciusornis* 动物群
									D.Yixianensis 生物带 *E.ovata* 生物带	*C. liaoningensis-Yanshanina dabeigouensis-Djungarica camarata* 组合			
	Valangi. —Haut.	冀北阶	早期热河生物群 139	大店子组 大北沟组 张家口组	*Piceites-Podocarpidites-Schizaeoisporites* 组合				*Nestoria pissovi* 生物带	*Luanpingella-Torinina-Rhinocypris-Stenestroemia* 组合	*Ephemeropsis trisetalis Coptoclava longipoda* 组合	*Peipiaosteus*动物群	
	Berriasian	?	? 145	土城子组上部					*Yanshanolepte stheria-Pingquanella-Lingyuanella* 组合	*Djunjarica-Mantelliana-Damonella-Stenestroemia* 组合			

图 5　东北地层大区早白垩世生物地层序列

据万晓樵等(2013)和全国地层委员会(2018)修改

统	阶 (国际阶)	阶 (陆相阶)	生物群	组	化石组合序列: 介形类	叶肢介	轮藻		浮游植物	孢粉	恐龙
上白垩统	Masstrichtian	绥化阶	明水生物群	明水组	Cypridea vasta-Talicypridea turgida-Cyclocypris valida 组合	Daxingestheria distincta 生物带	Atopochara ulanensis 生物带	Hornichara prolixa 亚带; Latochara longiformis 亚带	Tetranguladinium 组合	Tricolporopollenites-Ephedripites-Ulmoideipites 组合; Laevigatosporites-Aquilapollenites-Wodehouseia 组合	Mandschurosaurus amurensis 动物群
			79.1Ma	四方台组	Talicypridea amoena-Tumiasevia kaitunensis Paracandona qiananensis 组合			Hornichara anguangensis 亚带	Pediastrum-Aquadulcum 组合	Schizaeoisporites-Betpakdalina-Tricolporopollenites 组合	Neimongosaurus 动物群
	Campanian	松花江阶	松花江生物群	嫩江组	Talicypridea augusta-Harbinia hapla 组合	Mesolimnadiopsis anguangensis-Mesolimnadiopsis altilis 组合	Songliaochara heilongjiangensis-Charites cretacea 组合		Cleistosphaeridium-Dinogymniopsis minor 组合	Lythraites-Aquilapollenites-Schizaeoisporites 组合	
					Cypridea spongvosa-Strumosia inandita -S.salebrosa 组合						
					Cypridea ordinata-Ilyocyprimorpha netchaevae-Periacanthella portentosa 组合	Calestherites sertus 组合; Estherites mitsuishii 组合					
					Cypridea gunsulinensis-Cypridea ardua 组合. Cypridea squalida-C. anonyma-Cypridea spiniferusa 组合	Halysestheria qinggangensis 生物带; Plectestheria arguta 组合				Proteacidites-athidites-Dictyotriletes 组合	Jiyinosauropis johnsoni 动物群
	Coniacian-Santonian			姚家组	Cypridea dorsoangula-Ziziphocypris concta-Triangulicypris obinflatus 组合	Liolimnadia hongangziensis 生物带	Atopochara restricta 生物带	Aclistochara songliaoensis 亚带	Dinogymniopsis daqingensis 组合	Beaupreaidites-Cyathidites-Schizaeoisporites 组合	
					Cypridea exornata-Lycopterocypris retractilis 组合				Pediastrum-Granodiscus 组合	Cyathidites-Schizaeoisporites-Tricolpites 组合	
		农安阶		青山口组	Cypridea panda-Triangulicypris fusiformis 组合 Limnocypridea inflata-Sunliavia tumida 组合 Cypridea dekhoinensis-Limnocypridea copiosa 组合	Curoestheriopsis sanchaheensis —Dictyestheria elongate 组合			Granodiscus-Filisphaeridium 组合	Balmeisporites-Cyathidites-Classopollis 组合	
	Turonian				Triangulicypris torsuosus - Triangulicypris torsuosus nota 组合	Nemestheria qingshankouensis -Cratostracus merus 组合			Kiokansium-Dinogymniopsis 组合	Cicatricosisporites-Cyathidites-Pinuspollenites 组合	
				泉头组	Cypridea subtuberculisperga-Cypridea vetusta 组合			Amblyochara quantouensis 亚带	Nyktericysta-Operculodinium 组合	Schizaeoisporites-Quantonenpollenites-Tricolporopollenites 组合	
	Cenomanian				Cypridea elliptica-Cypridea deformata 组合	Orthestheriopsis songliaoensis 生物带					
			100.5		Mongolocypris limpida-Paracandona planiuscula 组合					Trilobosporites-Cyathidites-Tricolpopollenites 组合	Changchunsaurus parvus 动物群

图 6 东北地层大区晚白垩世生物地层序列

据万晓樵等(2013)和全国地层委员会(2018)修改

璋, 2012; 沙金庚和Lucas, 2012; Wan等, 2013; Zhou, 2014). 在未来的工作中, 中国陆相阶应该注意与国际海相阶的接轨, 以国际海相阶为标准, 在精确年代地层格架的基础上, 提高生物地层划分与对比精度, 建立与海相阶相对应的陆相地层的生物和其他标志.

3.3 白垩系重要地层界线

3.3.1 白垩系底界

侏罗纪-白垩纪界线(J/K)是显生宙唯一还没有定义的系级GSSP界线. 国际地层划分与对比以海相为标准, 目前趋于将钙虫类*Calpionella alpina*带之底、钙质超微*Nannoconus steinmannii minor* 和*N. kamptneri minor*二者的始现面作为侏罗系、白垩系的界线, 其中瓮虫类*Calpionella alpina*为J/K界线的首选标志(Wimbledon, 2017). 中国藏南发育海相侏罗系/白垩系界线, 东北地区发育较好的陆相侏罗系/白垩系界线.

中国海相侏罗系、白垩系界线出露于藏南的聂拉木和羊卓雍错地区(万晓樵等, 2005). 刘桂芳和王思恩(1987)认为侏罗系-白垩系的界线位于古错村组*Berriasella jacobi*与*B. grandis*菊石带之间, 但一些菊石研究人员对聂拉木地区出现*Berriasella jacobi*和*B. grandis*的鉴定存有疑问, 认为这两个种可能是不同的地区性类型. 最近对西藏南部羊卓雍错一带的研究明确该界线以菊石*Spiticeras* 和钙质超微化石 *Nannoconus st. steinmannii-N. st. minor-Watznaueria barnesae*组合的始现为标志(阴家润, 2016; 万晓樵等, 2016), 界线位于维美组和桑秀组/甲不拉组之间. 此外, 在藏南浪卡子一带桑秀组下部还获得了142~140Ma的SIMS锆石U-Pb年龄(Liu等, 2013), 在甲不拉组底部获得了早白垩世底栖有孔虫化石(方培岳和李罡, 2015).

中国陆相白垩系底界与国际地层表的对比尚无一致意见, 已有的同位素年龄与生物地层标志更是相去甚远, 使得对该界线的确定存有很大争议. 热河群的归属是认识J/K界线的关键. 以往将其划入上侏罗统(顾知微, 1983; 王思恩, 1985; 陈丕基, 1988), 抑或归于下白垩统(郝诒纯等, 1982a; 叶得泉和钟筱春, 1990; Smith等, 1995). 全国地层委员会(2002)将中国陆相J/K界线置于义县组与大北沟组之间, 采用137Ma的界线年龄. 2000年以来, 越来越多的学者逐渐认为热河群的时代应为早白垩世(Swisher等, 2001; 王松山等, 2001; Zhou等, 2003; 季强等, 2004; Sha等, 2006; 万晓樵等, 2013; Zhou, 2014; Li和Matsuoka, 2015). 由于土城子组同位素测年工作的进展, 其时代被确定为156~137Ma, 同时也是燕辽生物群向热河生物群演替的转折层位和时期(万晓樵等, 2016; Zhou和Wang, 2017), 考虑到国际地层年代表(2016)中的J/K界线年龄为145Ma, 冀北、辽西地区寻找J/K界线, 其位置势必大大下移, 可能位于土城子组内部(季强等, 2006; Sha等, 2006; 周忠和等, 2009; Li和Matsuoka, 2015; 万晓樵等, 2016; Zhou和Wang, 2017). 土城子组不仅是热河生物群向燕辽生物群的过渡层位, 而且国际年代地层的侏罗系/白垩系145Ma界线年龄亦位于其中. 对该组进一步详细的生物地层与年代地层工作, 有望为国际陆相侏罗系/白垩系界线研究做出"中国贡献".

3.3.2 白垩系顶界

白垩纪/古近纪界线因行星撞击和恐龙、菊石等生物的绝灭事件而备受关注. 国际上以铱异常层为该界线标志, 中国南雄盆地也有K/Pg界线的铱异常和碳氧同位素报道(赵资奎等, 2009, 2017). 我国海相白垩纪/古近纪界线大致在西藏南部宗山组与基堵拉组之间(万晓樵等, 2007), 塔里木盆地西部的争议比较大, 有吐依洛克组/阿尔塔什组之间、依格孜牙组/吐依洛克组之间和吐依洛克组内部三种不同方案(唐天福等, 1989; 郭宪璞, 1990; Xi等, 2016). 陆相白垩系顶界在松辽盆地和嘉荫盆地发育良好. 松辽盆地以轮藻*G. changzhouensis*亚带(李莎等, 2013)的首现面为标志, 界线附近可能发生了生物灭绝事件(Zhang等, 2018). 嘉荫盆地的界线研究更为深入, 孙革(2014)通过钻孔岩心研究, 将XHY-2006钻孔作为该界线的标准点位, 以孢粉*Aquilapollenites conatus-Pseudoaquilapollenites striatus*与*Triatriopollenites confuses-Aquilapollenites spinulosus*组合的界线为标志. 该界线上下曾测得两组同位素年龄, 分别为(66±1)Ma(李献华等, 2004)和(64.1±0.7)Ma(Suzuki等, 2011). 湖北江汉盆地和山东平邑盆地等在K/Pg界线的研究上亦取得进展(李伟同等, 2014; Li S等, 2016).

3.3.3 CNS顶底界(Aptian和Campanian阶底界)

白垩纪超静磁带(CNS)是地球演化中的重大事件, 其开始时间为M0r之底, 结束时间为M33r之底, 可在海陆地层中进行广泛对比. 目前, Aptian阶和Campanian

阶底界的GSSP尚未确定, M0r的开始被用来作为Aptian底界GSSP的候选标志之一, CNS的结束被用来作为Campanian底界GSSP的候选标志之一(Ogg和Hinnov, 2012). 虽然国际地质年代表将Aptian底界的时间定为126.3Ma(GST2012, GTS2016), 但古地磁学者更倾向于119或121Ma(Cande和Kent, 1995; Opdyke和Channell,1996), 其时代长期以来存在争议. He等(2012)通过对辽西地区义县组详细的测年和古地磁研究, 将M0r的开始时间确定为(121.2±0.5)Ma, 为Aptian阶的年代提供了直接的年代学证据. 松科1井南孔的岩心中记录了代表白垩纪超静磁期结束时C34n/C33r的古地磁极倒转, He等(2012)根据松科1井南孔磁性地层和SIMS U-Pb年, 得出CNS的结束年龄为83.4Ma. Wang等(2016)在He等(2012)的基础上, 结合新的CA-ID-TIMS高精度定年和校准的旋回地层学, 将CNS结束时间的精度进一步确定为(83.07±0.15)Ma. 虽然考虑到与国际地质年代表(GST2016)的一致性, 本文暂时使用126.3Ma和84.2Ma分别作为Aptian阶和Campanian阶的底界年龄, 但在未来的地质年代表中, 我们建议考虑121Ma和83.1Ma作为Aptian阶和Campanian阶的底界年龄. 因此, 中国东北地区陆相白垩纪地层学研究有望为国际Aptian阶和Campanian阶的界线年龄提供新的证据.

3.4　白垩纪重要生物群及地质事件

3.4.1　热河生物群

热河生物群是一个生活于早白垩世中期, 主要分布在东亚地区的陆生、湖泊相生物群(陈丕基和金帆, 1999; 张弥曼等, 2001; Zhou等, 2003; 季强等, 2004). 现代地球生态系统的雏形就形成于中生代的这一时期, 被子植物、鸟类、哺乳动物以及目前的海陆分布格局, 都从这一时期开始分化(Zhou等, 2003; Zhou, 2014). 早在20世纪20年代, 美国地质学家葛利普在辽西工作的时候提出“热河动物群(Jehol Fauna)”. 1962年, 顾知微提出了“热河生物群”的概念, 即东方叶肢介-三尾拟蜉蝣-狼鳍鱼(EEL)的湖相生物组合. 20世纪90年代以来, 随着大量脊椎动物、植物和昆虫等生物的发现, 热河生物群一直受到学界和公众的广泛关注.

目前, 虽然个别学者仍存有不同意见, 但基本将热河生物群产出主体层位的时代确定为早白垩世131~120Ma, 在125Ma前后达到峰值(Zhou, 2006, 2014). 热河生物群的分布范围存有不同看法. 狭义的热河生物群仅分布于辽西和相邻的冀北、内蒙古东部的义县组、九佛堂组及相当的层位(Pan等, 2013). 中国北方及俄罗斯远东、日本等地区所发现的早白垩世热河生物群分子是否属于热河生物群, 特别是冀北的大北沟组和大店子组所产出的化石是否属于热河生物群, 还存有不同意见(陈丕基, 1988; 王思恩, 1990; Pan等, 2013; Zhou, 2014). 滦平盆地新揭露的榆树下剖面(田树刚等, 2004; 覃祚焕等, 2017), 有望为早期热河生物群的研究提供新的材料. 随着研究的不断深入, 热河生物群不仅在生物地层、年代地层、分类和系统演化发现方面取得大量标志性成果, 在古生态、古环境等方面亦不断出新(Pan等, 2013; Zhou, 2014). 越来越多的研究表明, 热河生物群的起源与辐射, 可能与早白垩世火山喷发、燕山运动、华北克拉通破坏和相对寒冷或冷暖交替的气候存在密切关系(柳永清等, 2009; Amiot等, 2011; 朱日祥等, 2011; Zhou, 2014).

3.4.2　大洋缺氧事件与大洋红层

大洋缺氧事件(OAE)与白垩纪大洋红层(Cretaceous Oceanic Red Beds, 简写 CORB)研究因其与碳氧循环、古气候和古海洋变化的紧密关系, 已经成为国际白垩纪研究中的热点(王成善和胡修棉, 2005; Jenkyns, 2010; Hu等, 2012). 白垩纪中期海洋局部或区域性缺氧, 较为明显地集中在三个时期, 即Aptian-Albian期、Cenomanian/Turonian界线时期和Coniacian-Santonian时期, 分别简写为OAE1、OAE2和OAE3, 其中Cenomanian/Turonian期的界线事件表现得最为普遍. 在西藏南部岗巴–定日盆地, 大洋缺氧事件OAE1a和OAE2在地层中有良好记录, 分别出现在岗巴东山组和冷青热组顶部(Wan等, 2003). 在传统生物地层的基础上, 对我国藏南OAE2开展了高分辨率的碳同位素、旋回地层和古海洋演化等工作(Li等, 2006; Li等, 2017), 在界线处发现了冷泉碳酸盐(Liang等, 2016), 在OAE1的研究上最近也取得进展(Li等, 2016). 白垩纪大洋红层在全球广泛分布, 由我国学者率先提出(Hu等, 2005; Wang等, 2005). 白垩纪大洋红层为研究全球古海洋和古气候提供了新的窗口, 在连续三个国际地质对比计划的支持下(IGCP463, 494, 555), 在分布、成因、古海洋、古气候和与其他的地质事件的关联等方面取得大量成果(Hu等, 2012).

除了大洋缺氧事件和大洋红层, 中国陆相白垩纪红层广泛分布(郝诒纯等, 1986; 陈丕基, 2000a, 2000b;

曹珂, 2013), 在松辽盆地青山口组下部和嫩江组下部还发生了湖泊缺氧事件(LAEs)和湖海沟通事件 (黄清华等, 1998; 席党鹏等, 2010; Xi等, 2016). 大洋红层与缺氧事件和陆相红层与湖泊缺氧事件的对比研究, 是值得探讨的科学问题.

3.4.3 其他事件

"燕山运动"的概念由翁文灏提出(Wong, 1929), 是中国境内的晚中生代构造-岩浆作用的系统和过程统称, 分为"A"幕和"B"幕(董树文等, 2007). "A"幕发生于中晚侏罗世(165±5)Ma, 不同学者对"B"幕的定义不同, 但一般以张家口组火山岩下的不整合(约135Ma)这一转变作为"B"幕的开始(赵越等, 2004). 华北克拉通稳定性整体丧失的地质现象称之为华北克拉通破坏, 在早白垩世(约125Ma)达到峰值(朱日祥等, 2011), 中国东部早白垩世火山活动的主要时期为132~120Ma, 峰值为125Ma前后(Wu等, 2005), 在此背景下中国东部早白垩世发育了一系列规模和尺度各异的断陷盆地或盆地群. 嫩江组末期发生的"嫩江运动", 盆地构造开始发生反转, 嫩江组和明水组之间的地层缺失达3.8Ma的记录(Wu等, 2014), 生物面貌也由松花江生物群转换为明水生物群(万晓樵等, 2017).

白垩纪是典型的温室气候环境, 其中早白垩世处于总体升温的过程, 在白垩纪中期温度达到最高, 至晚白垩世晚期开始逐渐降温(Huber等, 2002; Hay, 2017). 我国东北地区的孢粉记录则反映了该变化过程(万晓樵等, 2017). 早白垩世热河生物群时期的低温或冷暖交替气候环境、白垩纪中期的高温气候环境和晚白垩世晚期的降温事件均获得了恐龙牙齿氧同位素、孢粉、木化石和古土壤氧同位素等证据(Amiot等, 2011; Zhao等, 2014; Gao等, 2015; Ding等, 2016; 王永栋等, 2017). 白垩纪温室气候环境可能与高CO_2浓度具有密切关系(Hay, 2017), 基于我国古土壤和植物化石恢复的CO_2浓度曲线亦证实了这一点(Wang等, 2014).

4 中国各大区地层对比格架

4.1 海相地层和海、陆交互相地层

海相或海陆交互相沉积主要分布于西藏、喀喇昆仑、塔里木盆地西端、东北三江盆地及台湾东部. 中国海相地层和海、陆交互相地层的对比主要基于生物地层. 有孔虫、钙质超微和菊石是国际上白垩纪地层划分与对比最重要的三个门类, 在我国藏南地区也得到了很好地应用. 在藏北、西昆仑、塔西南和黑龙江东部等地区, 由于海水较浅, 缺乏连续、可进行国际地层对比的上述三种化石, 双壳类、沟鞭藻、底栖有孔虫和介形类等生物则成为主要依据.

4.1.1 青藏高原

青藏高原南部是中国海相白垩系发育最好的地区. 海相地层主要分布在高原南部的喜马拉雅区、青藏雅鲁藏布江缝合带和拉萨地块(图7). 西藏南部下白垩统菊石及放射虫化石较为发育, 尤以江孜地区和聂拉木地区的菊石(刘桂芳, 1988; 徐钰林等, 1990; Yin和Enay, 2004; 阴家润, 2016)以及雅鲁藏布江地层区的放射虫(吴浩若, 2010)研究最为详细. 而Albian阶之上的生物地层系统则一般采用北喜马拉雅地层分区的有孔虫化石分带(万晓樵, 1990; 赵文金和万晓樵, 2003; Li G 等, 2009; 李国彪等, 2012). 西藏南部地区详细的生物地层划分与对比在前文已经述及.

日喀则弧前盆地桑祖岗组的时代为Aptian-Albian期, 昂仁组-曲贝亚组的时代可能为Albian晚期-Maastrichtian期(万晓樵等, 2007; Wang等, 2012). 林周盆地林布宗组的孢粉和种子蕨化石显示其时代为早白垩世(杨小菊和李建国, 2016); 塔克那组的时代过去被认为属于Aptian-Albian(Leier等, 2007), 但最新的底栖有孔虫显示其时代可能为Aptian期(Boudagher-Fadel等, 2017). 色林错盆地多尼组生物地层时代为早白垩世Barremian(Valanginian?)-Aptian期(文世宣等, 2000; 郑春子等, 2003), 但该组上部的火山岩中获得了116~115Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄(康志强等, 2009), 表明可能延续到了Aptian晚期; 郎山组化石丰富, 该组上部的固着蛤动物群时代为Albian晚期, 可与日喀则弧前盆地桑祖岗组的固着蛤对比(Rao等, 2015, 2017), 底栖大有孔虫的时代为Aptian-Cenomanian早期(Boudagher-Fadel等, 2017). 羌塘盆地索瓦组上段含早白垩世早期的菊石等化石, 其时代进入早白垩世早期(朱丽霞等, 2012), 可能是该地区最高海相记录. 冈底斯和羌塘盆地海相层之上的设兴组、竞柱山组和阿布山组主体为陆相红层. Li等(2013, 2015)在阿布山组底部和上部分别获得(102.6±1.6)和(75.9±0.5)Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄; Sun等(2012)在设兴组上部获得了(72.4

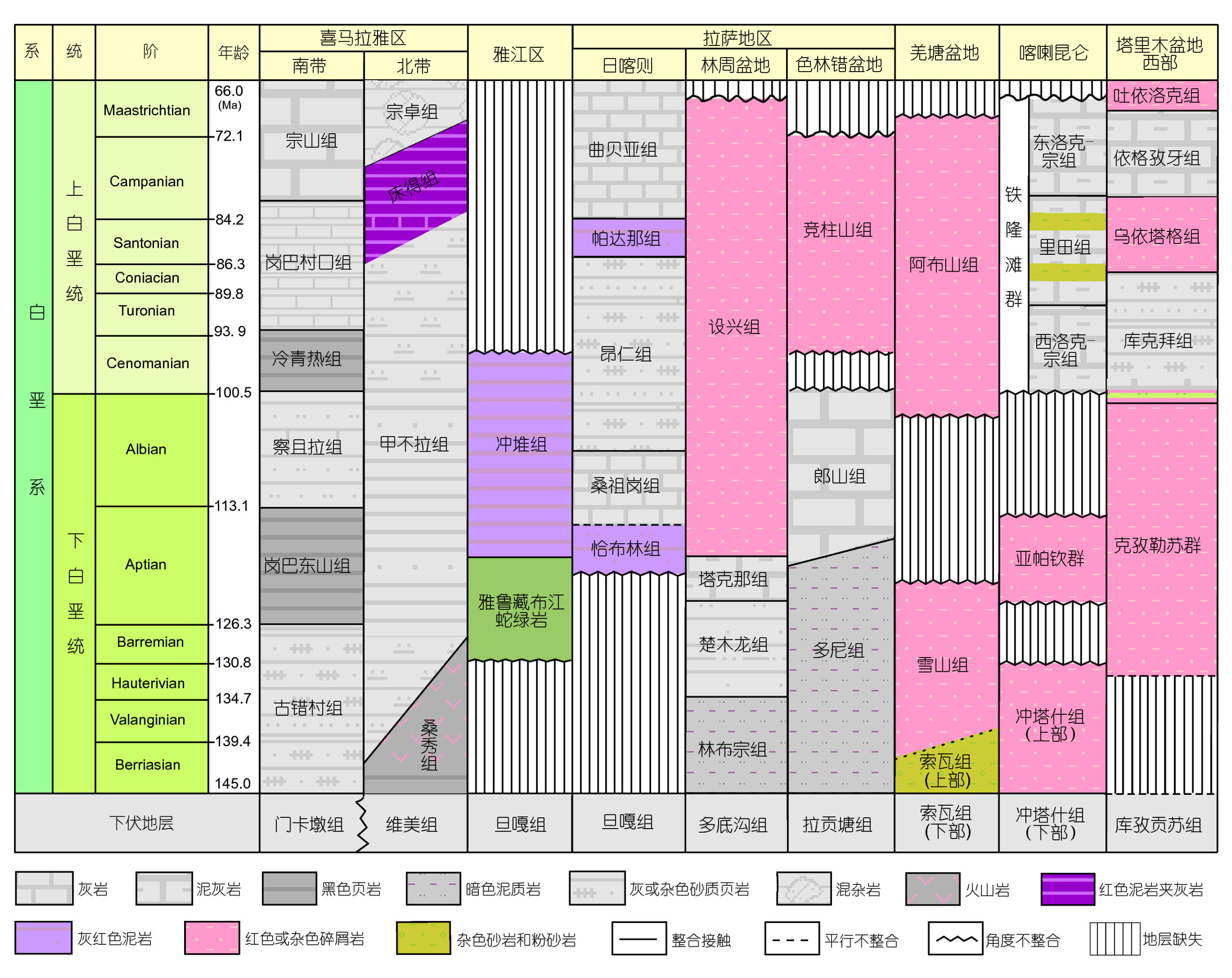


图 7　新藏特提斯地层大区白垩纪地层划分对比

±1.8)Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄; 李华亮等(2016)通过ESR年代学、磁性地层学和腹足类生物地层学等方法, 提出竞柱山组的时代为96~73Ma.

4.1.2　喀喇昆仑和塔里木盆地西部

喀喇昆仑下白垩统仅在亚帕钦群见有孔虫的报道, 上白垩统铁隆群为海相沉积. 铁隆滩群自下而上分为西洛克宗组、里田组和东洛克宗组, 均以灰岩为主, 产丰富的双壳类和少量其他化石, 时代Turonian晚期-Maastritian期(文世宣等, 2000). 塔里木盆地西部下白垩统克孜勒苏群以陆相红色碎屑沉积为主, 中上部偶见海相化石(陈金华等, 2001); 上白垩统库克拜组、乌依塔格组、依格孜牙组和土依洛克组(部分学者将天山分区的乌依塔格组、依格孜牙组和土依洛克组合并为东巴组)为海相地层. 20世纪80~90年代, 我国学者对塔西南海相地层和古生物开展了大量研究, 通过对有孔虫、介形类、双壳类、腹足类、钙质超微、沟鞭藻等多门类化石的研究, 建立了详细的化石带或组合, 提出了相应的地层划分与对比方案(郝诒纯等, 1982b, 2001; Mao和Norris, 1988; 唐天福等, 1989; 郭宪璞, 1990; 何承全, 1991; 潘华璋等, 1991; 钟石兰, 1992; 蓝琇和魏景明, 1995; 杨恒仁等, 1995). 最近, Xi等(2016)基于对斯姆哈那剖面的化石新材料和已发表的不同门类的生物地层资料, 总结了塔西南地区晚白垩世海相地层时代(图7). 塔里木盆地西部晚白垩世为海湾环境(郝诒纯等, 1982b, 2001; 唐天福等, 1989; Xi等, 2016),

生物以底栖类型为主, 浮游生物较少, 尚需要进一步提高地层对比精度.

4.1.3 黑龙江东部、台湾和其他地区

黑龙江东部海相地层包括纯海相的东安镇组上部和海陆过渡相的龙爪沟群和鸡西群, 在早白垩世为海湾环境(图8)(Sha, 2007). 东安镇组的时代为Berriasian-Valangian期(Sha, 2007). 龙爪沟群和鸡西群地层长期以来受到较多关注, 存在很大分歧. 20世纪90年代前将该两群的时代归为中、晚侏罗世. 20世纪90年代以来, 随着双壳类、菊石、沟鞭藻、有孔虫等研究进展, 基本将其时代确定为早白垩世, 大致为Hautervian-Albian期(沙金庚, 1990; Li和Yang, 2003; Li和Yu, 2004; Sha, 2007; Li和Bengtson, 2018). 最近, Chen等(2018)通过对鸡西群城子河组两层火山灰的锆石LA-ICP-MS定年, 获得了(115.7±1.0)和(111.7±1.1)Ma两组年龄, 与生物地层的结论(Sha, 2007)比较一致. 龙爪沟群和鸡西群之上为陆相地层(具体见陆相白垩系一节).

台湾地区海相白垩系主要分布于台湾西部平原区和东部沿岸带, 主要为天祥(岩)组上部和云林组. 根据其所含的钙质超微、双壳类、菊石和沟鞭藻等海相化石, 将其时代确定为早白垩世(文世宣等, 2000; Wan等, 2007). 除此之外, 在我国云南西部、东南沿海和松辽盆地陆相地层中偶尔见到海相夹层或受海水影响的层位(郝诒纯等, 1986; Chen, 2003; Xi等, 2016).

4.2 陆相白垩系

中国陆相白垩纪沉积广泛、类型多样, 不同地区或盆地的差异性大. 本文将陆相白垩纪地层分为东北、华北、东南、中南、西南、西北6个大区. 上述6个大区根据沉积和地层分布特征进一步可以归为两部分, 即东部火山活动带和西部大-中型稳定沉积盆地区. 东部火山活动带包括了东北、华北和东南三大区. 白垩纪大地构造处于相对活跃期, 早白垩世燕山运动

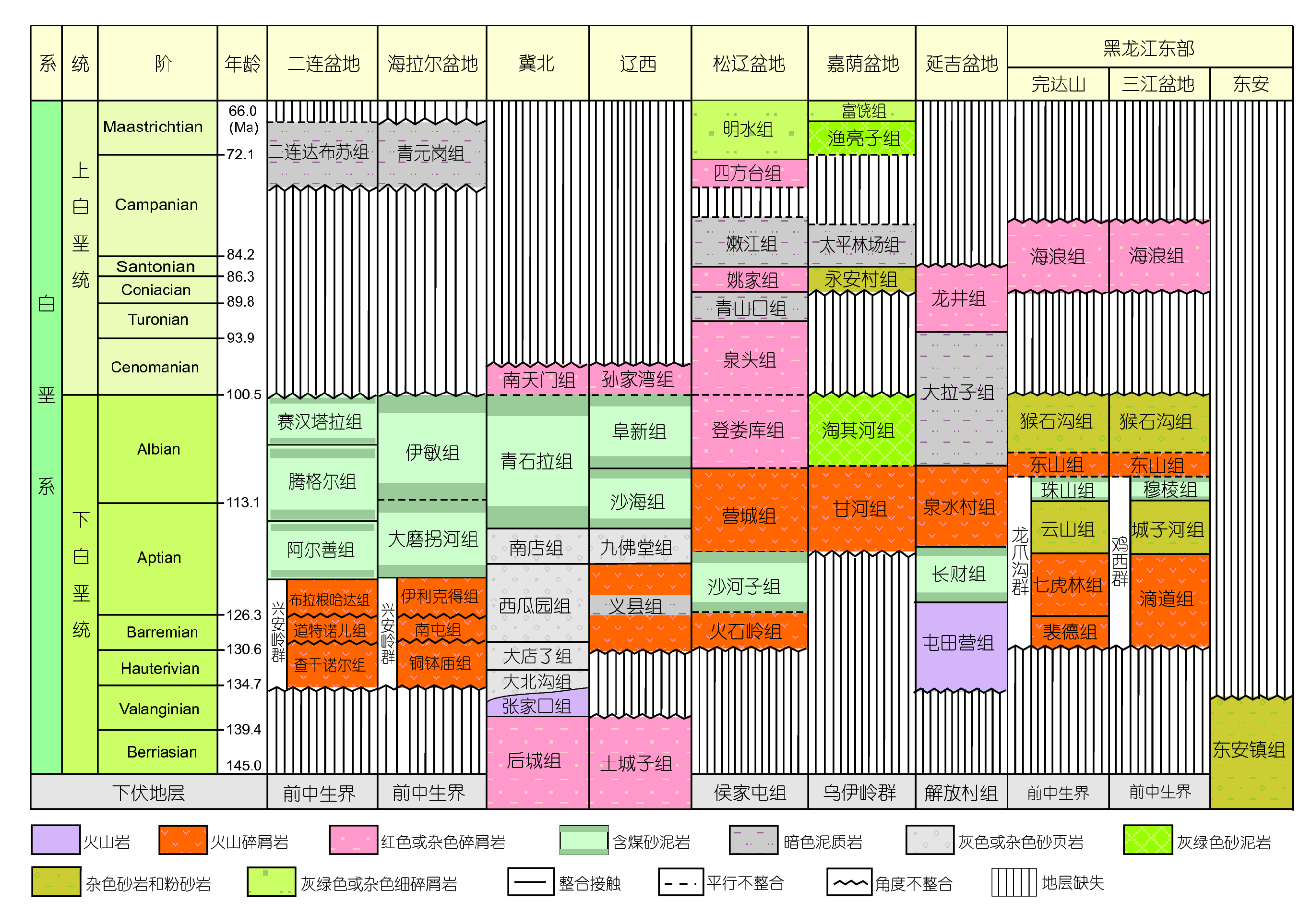


图 8 东北地层大区地层划分与对比

等导致了中国东部一系列北北东向、北东向或近东西向展布的断陷盆地火山岩、细碎屑岩夹火山岩，以及煤系或红层为特色的沉积建造. 晚白垩世构造和火山活动有所减弱，并且东移. 西部稳定大-中型稳定沉积盆地区包括西北、西南和中南区，以红色碎屑沉积为主, 构造相对稳定, 缺乏火山活动和火山灰等沉积.

东部火山活动带含化石丰富，火山岩和火山灰分布广泛，本文在地层划分与对比时采取生物地层与同位素年龄相互验证的方法，同时参考古地磁等其他证据. 西部大-中型稳定沉积盆地区缺乏火山岩或火山灰定年，以生物地层和磁性地层为主，同时参考其他资料. 生物地层方面，以东北地区的热河生物群、松花江生物群和明水生物群作为与其他地区对比的标准，注重陆相地层中的海相夹层和重要门类演化的关键时间节点，如松辽盆地嫩江组一段下部有孔虫的时代显示为Santonian期，介形类*Talicypridea*普遍于Campanian早期出现. 虽然东部地区同位素年龄数据丰富, 但质量参差不齐, 特别是早期发表的一些K-Ar和Rb-Sr测年结果, 需要加以甄别.

4.2.1　东部火山活动带

东北地区白垩纪地层发育，分布广泛，地层厚度大, 化石丰富, 是我国陆相白垩纪研究的经典地区. 东北经典地层序列被全国地层委员会指定为中国白垩纪陆相年代地层的标准，全国地层委员会(2018)亦采用该区的地层序列. 本文以冀北-辽西地区早白垩世地层和松辽盆地晚白垩世地层为标准，基于岩石地层、生物地层、年代地层和磁性地层，完成了东北大区地层划分与对比方案(图8).

松辽盆地火石岭组以往被认为晚侏罗世，新的锆石LA-ICP-MS U-Pb测年结果显示火石岭组上部的时代为125Ma左右(黄清华等，2011)，沙河子组含热河生物群的分子(黄清华等, 2011), 营城组的锆石U-Pb年龄集中在119~109Ma之间(Zhang等，2011). 松辽盆地的上/下白垩统界线，根据孢粉组合，置于登娄库组和泉头组之间(黎文本, 2001). 延吉盆地在叶肢介、古植物等生物地层取得较大进展(Sun等, 2016; Li G等, 2016), 并在大拉子组和龙井组底部分别获得一批火山岩/火山灰锆石U-Pb年龄(Sun等，2016). 海拉尔盆地早白垩世兴安岭群的火山岩中获得了126~120Ma的锆石U-Pb年龄(赵磊等，2013)，时代上与义县组相当，青元岗组的介形类化石、二连盆地二连大布苏组的介形类、轮藻和脊椎动物化石显示其时代为Campanian晚期–Maastrichtian早期(叶得泉和钟筱春，1990; Van Itterbeeck等, 2005). 嘉荫盆地在晚白垩世曾经和松辽盆地连为一体，早白垩世宁远村组火山岩在时代上大致与营城组和泉水村组相当，太平林场组可与松辽盆地嫩江组对比，两者具有相同的叶肢介分子(Li等，2009)，渔亮子组、富饶组大致可与四方台组、明水组对比(孙革，2014). 黑龙江东部的东山组、猴石沟组为Albian期(Sha，2007)，海浪组的叶肢介化石*Halysestheria yui*同时产于松辽盆地嫩江组中(Li等, 2009).

华北地区白垩纪沉积盆地主要有胶莱盆地、苏北盆地和合肥盆地等，以胶莱盆地白垩系发育最为典型，研究程度较高(图9). 胶莱盆地发育着完整的白垩纪陆相地层和沉积记录，由下至上发育早白垩世莱阳群、青山群和晚白垩世王氏群，产有大量的恐龙骨骼和遗迹化石，是近年来的研究热点(柳永清等，2011; 季强，2017; 张嘉良等, 2017). 莱阳群下部玄武质火山岩^{40}Ar/^{39}Ar年龄131~130Ma，锆石U-Pb年龄为129Ma左右；青山群火山岩最新的锆石U-Pb测年结果显示其年龄在120~115Ma之间(曹光跃等, 2014; 秦华峰等, 2016); 王氏群红土崖组出露的玄武岩的^{40}Ar/^{39}Ar年龄为(73.5±0.3)Ma(闫峻等, 2003). 鲁科1井科学钻探(LK-1)对胶州组和红土崖组开展了详细的岩石地层、磁性地层、生物地层和火山岩^{40}Ar/^{39}Ar年龄的工作(季强, 2017). LK-1井红土崖组顶部的玄武岩的Ar-Ar年龄为(73.5±1.1) Ma(Li等，2018)，白垩纪/古近纪界线可能位于胶州组上部(季强，2017). 盆地发育着与华北北部热河生物群相似的早白垩世陆地生物群和以鸭嘴龙为代表的晚白垩世生物群(柳永清等, 2011; 张嘉良等, 2017). 本文的胶莱盆地的地层格架主要参照山东省地质调查院(2017)[1)]及其他已发表的生物地层及同位素年龄数据.

苏北盆地白垩系在江苏地区出露零星，且红层较多，含化石稀少，生物地层研究仅局限于某些地区的某个层段. 张一勇和李建国(2000)、周山富等(2009)利用井下资料建立了较系统的孢粉地层序列，陈丕基等(2012)对泰州组做了多门类生物地层研究，下部化石

1) 山东省地质调查院. 2017. 胶东地区白垩纪区域地质、盆地发育与岩石地层系统调查研究. 401

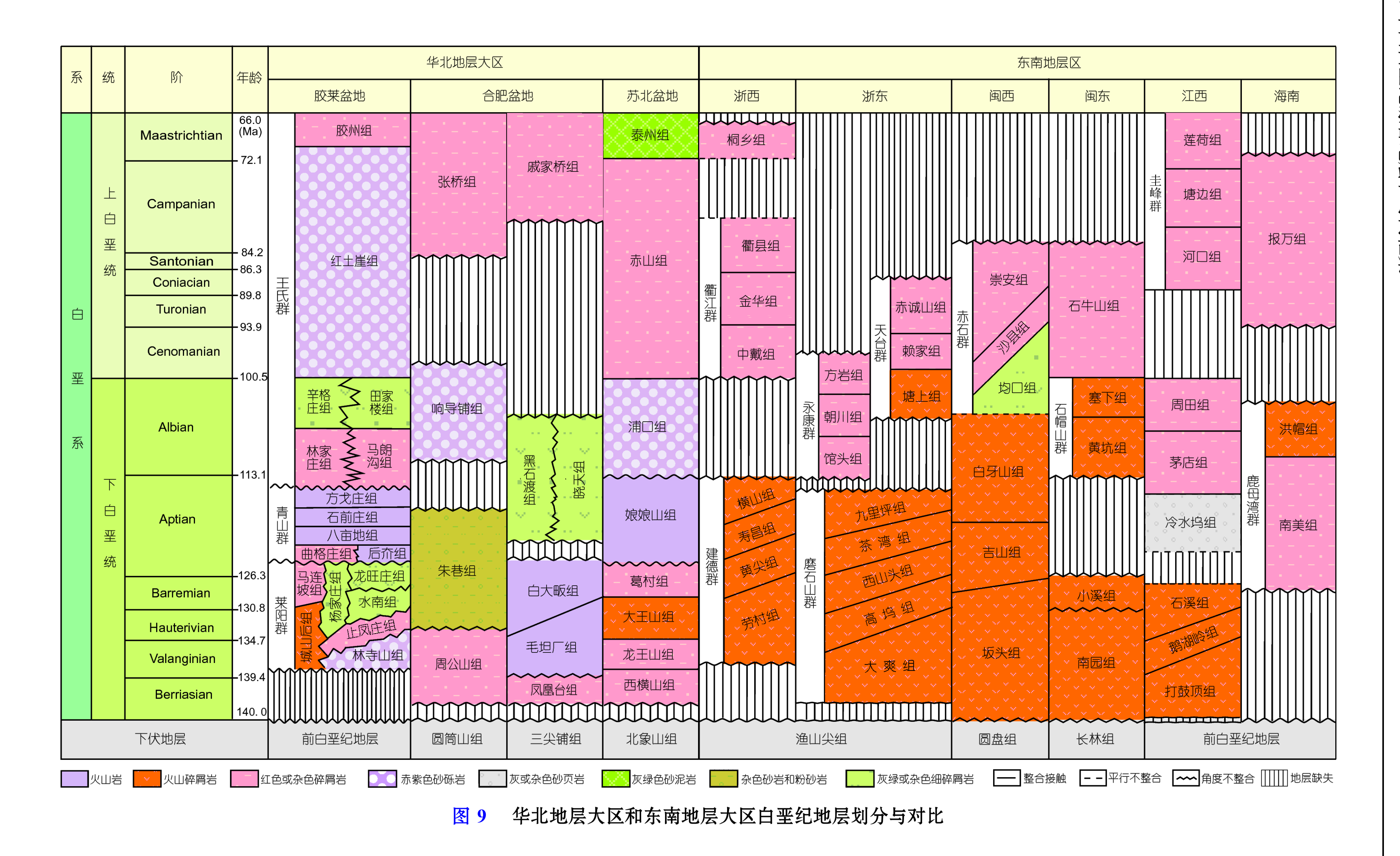


图 9 华北地层大区和东南地层大区白垩纪地层划分与对比

组合具有晚白垩世特征, 时代应限于Campanian-Maastrichtian期, 上部化石组合显示泰州组上部已经进入古新统. 此外, 龙王山组的火山岩获得了(134.8±1.3)Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄(周涛发等, 2011). 合肥盆地南部和北部的白垩纪地层系统存在较大差异, 地层划分与对比存在较大争议. 毛坦厂组产中期热河生物群分子, 黑石渡组则产晚期热河生物群分子(陈丕基和袁凤钿, 1993), 时代属于早白垩世早中期. 最新的同位素年龄结果显示, 凤凰台组、周公山组属于早白垩世早中期, 之下的圆筒山组合三尖铺组的时代则被归为侏罗纪(王薇等, 2017).

东南沿海地区下白垩统普遍发育火山沉积岩系, 上白垩以红层为主, 夹少量火山岩夹层(陈丕基, 2000a) (图9). 东南沿海地区白垩纪发生了多期次的大规模火山喷发事件, 形成多层火山岩或凝灰岩夹层(Li, 2000), 有利于同位素定年工作的开展. 本区白垩纪地层富含介形类、叶肢介、双壳类、腹足类、鱼类和恐龙等化石, 以浙江地区地层发育最为齐全, 研究程度最高, 自下而上可分为建德生物群、永康生物群、衢江生物群和同乡期化石组合(蒋维三等, 1993; 陈丕基, 2000a; 丁保良等, 2010). 李祥辉等(2018)最近对东南沿海地区已发表的白垩纪锆石U-Pb年龄进行了系统总结, 提出建德群的年龄在138~115Ma之间; 王非等(2010)对浙江东部火山岩$^{40}Ar/^{39}Ar$测年结果显示, 磨石山群大爽组顶-九里坪组形成于118~109Ma之间, Liu等(2016)在大爽组下部获得~140Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄. 本区下白垩统上部-上白垩统地层的划分与对比仍存在较大争议, 部分学者认为衢江群、永康群和天台群是早白垩世晚期-晚白垩世早期的同期异相沉积(蔡正全和俞云文, 2001; 张国全等, 2012). 马之力等(2016)在丽水盆地官头组和朝川组获得122~112Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄; He等(2013)在天台群赖家组和赤城山组分别获得了99~96Ma和94~91Ma的锆石SIMS 锆石U-Pb年龄, 与恐龙蛋生物地层的结果一致(汪筱林等, 2012). 衢江群的中戴组、金华组和衢县组所含的生物面貌为晚白垩世早、中期(陈丕基, 2000a; 丁保良等, 2010), 可与松辽盆地的泉头组-嫩江组对比, 其中衢县组产出的介形类*Talicypidea*表明其时代可能进入Campanian早期. 桐乡组分布局限, 该组的介形类化石和轮藻化石的组合面貌与江苏泰州组相似, 属于Maastrichtian期(陈丕基, 2000a; 丁保良等, 2010). 福建西部早白垩世坂头组的时代为148~127Ma(胡广等, 2011; Liu等, 2016; 李祥辉等, 2018), 东部南园组的年龄为145~130Ma, 小溪组的年龄为130~127Ma(段政等, 2013; Liu et al., 2016). 石帽山群(黄坑组和塞下组)的生物面貌可与永康生物群对比(郑克丽, 2012), 黄坑组的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为112~108Ma(Jiang等, 2015),表明该群的时代可能为早白垩世晚期, 赤石群(均口组、沙县组和崇安组)和石牛山组的的生物面貌和衢江生物群类似, 时代主要为晚白垩世早期(郑克丽, 2012), 但下部的地层也可能包含部分早白垩世晚期的地层(李祥辉等, 2018). 邢光福等(2013)在崇安组底部获得~98.5Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄. 江西地区的打鼓岭组、鹅湖岭组和石溪组主要为火山岩或含火山碎屑的碎屑岩沉积, 主体形成于早白垩世早期(144~128Ma) (李祥辉等, 2018). 冷水坞组、茅店组和周田组的时代为早白垩世晚期, 而上部的圭峰群(河口组、塘边组、莲荷组)以红色碎屑沉积为主, 产晚白垩世恐龙蛋和介形类等化石, 其中河口组玄武岩的同位素年龄为89~86Ma, 表明该群的时代为可能为晚白垩世早中期(巫建华等, 2002). 海南地区发育白垩纪地层, 下白垩统南美组的植物化石可与浙江馆头组、寿昌组对比, 时代为早白垩世中晚期, 上白垩统报万组的孢粉化石具有晚白垩世特征(符国祥, 1995).

4.2.2　中西部大-中型稳定沉积盆地区

西北地层大区陆相白垩纪地层主要包括塔里木盆地北部的库车凹陷、准噶尔盆地、吐鲁番-哈密盆地、柴达木盆地、西宁-民和盆地、鄂尔多斯盆地和六盘山盆地等盆地(图10). 孢粉、介形类和轮藻等化石均表明亚格列木组-巴西盖组的时代属于早白垩世, 可与塔西南地区的克孜勒苏群对比(陈金华等, 2001; 郭宪璞等, 2011; 江德昕等, 2006). 巴什基奇克组的时代存在较大争议, 郝诒纯等(1986)综合不同门类的生物, 将其时代确定为晚白垩世, 后来进一步在该组上部发现了晚白垩世钙质超微化石(郝诒纯等, 2000b); 王启飞等(2000)根据该组的介形类、轮藻和孢粉等化石组合将其时代确定为早白垩世中晚期; 彭守涛等(2005)通过详细的古地磁地层工作, 提出亚格列木组-巴西盖组可对比白垩纪磁性带M18–M3, 相当于Berriasian晚期至Barremian早期, 巴什基奇克组大致与晚

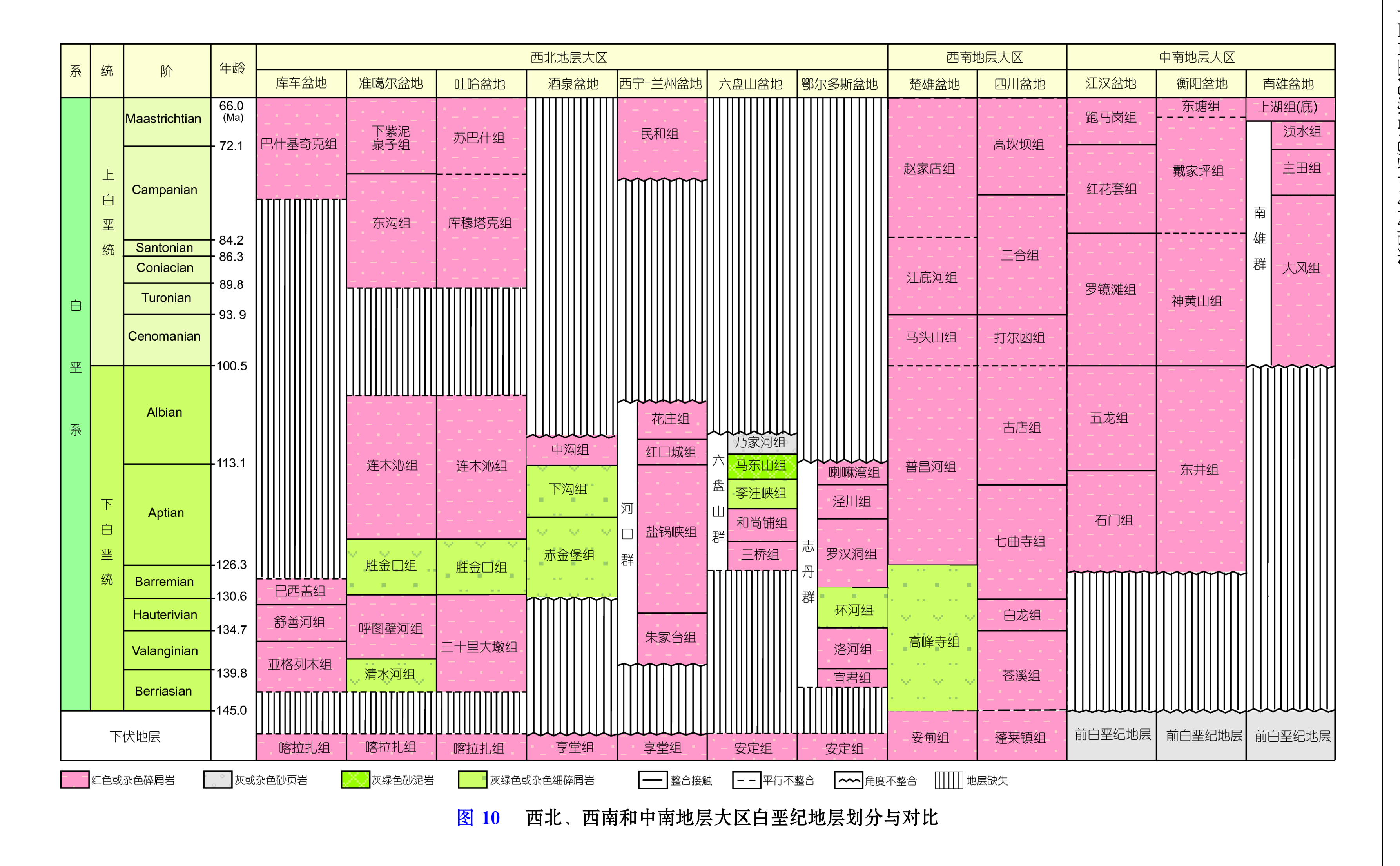


图 10　西北、西南和中南地层大区白垩纪地层划分与对比

白垩世Campanian中晚期至Maastrichtian相当. 本文暂时将巴什基奇克组置于晚白垩世, 该组的时代尚需要进一步的研究.

准噶尔盆地白垩纪地层在盆地南缘发育最为完整, 以轮藻生物地层研究程度最高. 杨景林等(2008)建立了4个轮藻化石带、1个亚带和1个组合, 提出清水河组-连木沁组的时代为早白垩世Berriasian-Barremian, 东沟组的时代为晚白垩世. 郑秀亮等(2013)根据介形类化石推断东沟组时代可能为Coniacian-Campanian期. 紫泥泉子组的时代存在争议, 介形类和轮藻生物地层研究表明该组下部为晚白垩世, 上部为古近纪, 中间可能存在地层缺失(杨景林和沈一新, 2004; 郑秀亮等, 2013).

酒泉盆地、西宁-兰州盆地、柴达木盆地、六盘山盆地和鄂尔多斯盆地主要发育早白垩世地层, 西宁-兰州盆地发育早白垩世的河口群和晚白垩世的民和组. 酒泉盆地的研究程度相对较高, 不同学者对该盆地早白垩世地层开展了古植物、轮藻、介形类、孢粉和昆虫等生物地层的对比(王启飞等, 2003; 胡艳霞和徐东来, 2005; 邓胜徽和卢远征, 2008; Zhang M Z等, 2016; Zheng等, 2015). 赤金堡组见大量的热河生物群分子, 大致可与义县组对比(邓胜徽和卢远征, 2008); 旷红伟等(2013)在中沟组底部的玄武岩和玄武安山岩中获得(113.7±1.8)Ma的SHIMP锆石U-Pb年龄; Liu等(2017)最近通过旋回地层学研究, 推测下沟组的持续时间为6.1Myr. 基于对古生物、同位素年龄和旋回地层学的综合分析, 完成了对金堡组、下沟组和中沟组地层的对比(图8). 西宁-兰州盆地白垩纪地层分下白垩统河口群和上白垩统民和组. 河口群以杂色的粗碎屑岩沉积为主, 自下而上分为朱家台组、盐锅峡组、红古城组和花庄组, 生物面貌具有早白垩世特征(尤海鲁等, 2006; 唐玉虎, 2008), 详细的磁性地层工作进一步将该群的时代确定为138~106Ma. 柴达木盆地犬牙沟群含介形虫、轮藻化和孢粉等石, 时代为早白垩世(杨平等, 2011). 六盘山盆地的六盘山群主要由红色、灰绿色碎屑岩组成, 自下而上分为三桥组、和商铺组、李洼峡组、马东山组和乃家河组. 戴霜等(2009)根据详细的磁性地层工作, 将六盘山群的时代确定为127~110Ma, 与生物地层学的结果一致(齐骅, 1988; 李建国和杜宝安, 2006; 张明震等, 2012). 鄂尔多斯盆地的志丹群以红色碎屑为主, 自下而上分为宜君组、洛河组、环河组、罗汉洞组和泾川组. 志丹群下部(宜君组、洛河组和环河组)磁性地层的时代大致为141~135Ma(黄永波, 2010). Li(2017)通过该群上部的叶肢介化石与辽西等地区的地层的对比, 认为其时代为Aptian.

中南地层大区发育一套山间和断陷盆地的红色碎屑沉积, 以江汉盆地、衡阳盆地和南雄盆地为代表. 该地区的地层中含有较为丰富的孢粉、介形类、叶肢介和腹足等化石, 其中以孢粉化石的研究最为系统. 张清如(2009)根据孢粉化石组合, 对该地区的白垩纪地层进行了初步总结. 江汉盆地白垩纪地层主要依据早年开展的介形类、轮藻和孢粉等化石建立(图10). 近些年部分学者根据轮藻和孢粉化石, 提出白垩纪/古近纪界线位于跑马岗组和与之相当的渔洋组内部(李伟同等, 2014). 衡阳盆地的地层主要依据早期的介形类、轮藻、孢粉和叶肢介等化石和磁性地层建立(葛同明等, 1994; 陈丕基, 2000a), 本次的对比结果主要参考了磁性地层和生物地层资料. 广东南雄盆地发育良好的白垩纪-古近纪地层, 因含丰富的恐龙、恐龙蛋、蜥蜴、哺乳动物, 以及介形类、孢粉、腹足类等晚白垩世-古新世化石而成为中国陆相K/Pg界线研究的热点地区(赵资奎等, 2009, 2017; 童永生等, 2013; 张显球和李罡, 2015). 围绕K/Pg界线, 开展了大量的岩石地层划分与对比、生物地层、磁性地层和化学地层等方面的工作(赵资奎等, 2009, 2017; Clyde等, 2010; 汪筱林等, 2012; 童永生等, 2013; 张显球等, 2013). K/Pg界线可能位于上湖组底部(童永生等, 2013)或更高一些的层位(张显球和李罡, 2015). 相比K/Pg界线上下地层, 其他时期的地层研究程度仍相对较低, 其划分方案存在较大争议, 本文暂时采用郝诒纯等(2000a)的划分方案.

西南地层大区白垩纪地层以红色碎屑沉积为主, 以四川盆地、云南的楚雄盆地和兰坪-思茅最为典型. 区内白垩纪陆生生物繁盛, 其中介形类和叶肢介化石数量丰富, 研究程度较高, 是该地层划分对比的首要依据(陈丕基, 1975; 赵自强和丁启秀, 1996; 侯佑堂等, 2002; 陈丕基, 2000a, 2000b, 2012). 西南地区的白垩系属于流入古地中海水系西南湖群中的沉积, 古生物是一个相对独立区系(陈丕基, 2000b). 除了生物地层, 早期对四川盆地和兰坪-思茅盆地开展过磁性地层学研究(庄忠海等, 1988; 尹济云等, 1999); Wang L等(2015)在思茅盆地勐野井组获得110~100Ma的SHIMP锆石U-

Pb年龄, 表明火山灰同位素定年在西部地区亦具有潜力. 四川盆地白垩纪地层在不同区域有不同的分布, 本文中的早白垩世地层选择盆地北部梓渔—巴中地区的苍溪组、白龙组、七曲寺组和古店组做为标准, 晚白垩世地层选择盆地南部宜宾地区的打尔函组、三合组和高坎坝组做为对比标准, 地层对比方案参考陈丕基(2000a, 2000b)和曹珂(2013). 云南楚雄盆地白垩纪地层包括下白垩统的高峰寺组、普昌河组和上白垩统的马头山组、江底河组和赵家店组(陈丕基, 2000a, 2000b).

4.3 中国白垩纪地层综合对比

在论述各地层区海、陆相地层划分与对比的基础上, 本文完成了中国白垩纪综合地层划分与对比(图11). 中国白垩纪地层以陆相为主体, 海相地层仅分布于西部的新藏大区和东部的西太平洋西缘. 海相地层以青藏南部最为完整, 在塔西南、喀喇昆仑等地区仅发育上白垩统海相地层, 黑龙江东部仅发育下白垩统海相地层. 陆相白垩纪地层在时间上和空间上均具有很大的差异性. 早白垩世早期, 陆相白垩纪地层在大部分地区缺失, 仅在冀北、四川盆地等少数地区发育有连续的地层; 早白垩世中晚期, 陆相主要盆地均有沉积记录, 热河生物群的分子在北方地区广泛分布; 晚白垩世早期, 陆相白垩纪地层在西北地区广泛缺失, 在东北地区除松辽盆地外, 均有不同程度的缺失; 晚白垩世地层除松辽盆地和中南、西南地区之外在其他地区均有不同程度的缺失.

中国陆相白垩系分布广泛, 类型丰富, 富含化石和火山岩/火山灰, 是建立全球连续陆相白垩纪地层序列和生物演化序列的理想地区. 中国藏南是东特提斯海相白垩系的立典研究区. 白垩纪时期, 中国西接东特提斯洋、中亚和东南亚等地区、东邻西太平洋和西伯利亚–阿拉斯加地区, 中国白垩纪地层的划分与对比结果对于全球海、陆白垩系的对比亦具有重要的价值.

5 结语、存在问题和研究展望

本文归纳了中国白垩纪地层学研究进展. 在生物地层学基础上, 综合磁性地层学、同位素年代学、旋回地层学和化学地层学等成果, 完成不同区的地层划分与对比, 建立了完整的白垩纪年代地层框架.

虽然中国白垩纪地层的研究已取得很大进展, 建立了不同区域之间的对比关系, 但还存在以下几个方面的问题.

(1) 藏南海相白垩纪浮游有孔虫、钙质超微和菊石等化石带与西特提斯和大西洋等地区的对比精度有待进一步提高; 藏北、喀喇昆仑、塔里木盆地西部和黑龙江东部以滨浅海或海湾为主, 缺乏可进行全球对比的浮游生物化石, 地层对比精度较低.

(2) 中国陆相白垩系以东北地区的研究程度较高, 其他地区的问题仍比较多. 华北和东南沿海区虽然有大量火山岩/火山灰夹层, 化石丰富, 但存在地层出露有限、岩性相变大、同位素年龄的质量参差不齐等问题, 在一定程度上影响了地层划分与对比的精度. 西北、西南和中南地区, 由于缺乏可直接定年的火山物质, 地层的划分与对比缺乏足够依据.

(3) 中国白垩系底界问题目前还存在较大争议, 一方面, 国际侏罗系/白垩系界线金钉子(GSSP)尚未确定, 另一方面, 我国大多地区J/K界线上下地层不够连续, 或为粗碎屑岩, 造成生物记录的不完备, 使J/K界线的深入研究受到很大制约. 此外, 下白垩统除了Albian阶最近确定了GSSP, 其余各阶的GSSP和底界年龄均未确定, 频繁变动, 尤其Aptian阶底界年龄长期存在~126Ma和~121Ma两种不同的观点, 给中国早白垩世地层的精细对比带来很大影响.

(4) 虽然中国白垩纪地层记录了丰富的生物、环境、气候和构造等地质事件, 但这些事件发生的准确时间和大区域对比研究尚不够深入.

未来的工作中, 中国白垩系研究要进一步达到海陆地层整合, 尤其是要加强陆相白垩纪地层的研究, 建立可与海相地层对比的陆相地层系统. 为此, 今后的研究需注意如下几个方面.

(1) 加强生物地层学研究, 提高生物地层对比的精度. 中国海相地层需要建立与国际标准化石带精细对比的浮游生物带和可大区域对比的底栖生物组合. 中国是全球陆相白垩纪地层和生物最为丰富的地区, 建立连续的古植物、孢粉、叶肢介、介形类、双壳、轮藻和恐龙等生物序列, 识别重要的生物演化节点, 建立有精确年龄控制的生物地层框架.

(2) 中国中西部陆相地层缺乏可定年的火山灰等物质, 要注意火山灰夹层的寻找, 开展磁性地层和旋回地层学的研究; 东部地区要提高火山岩/火山灰层定

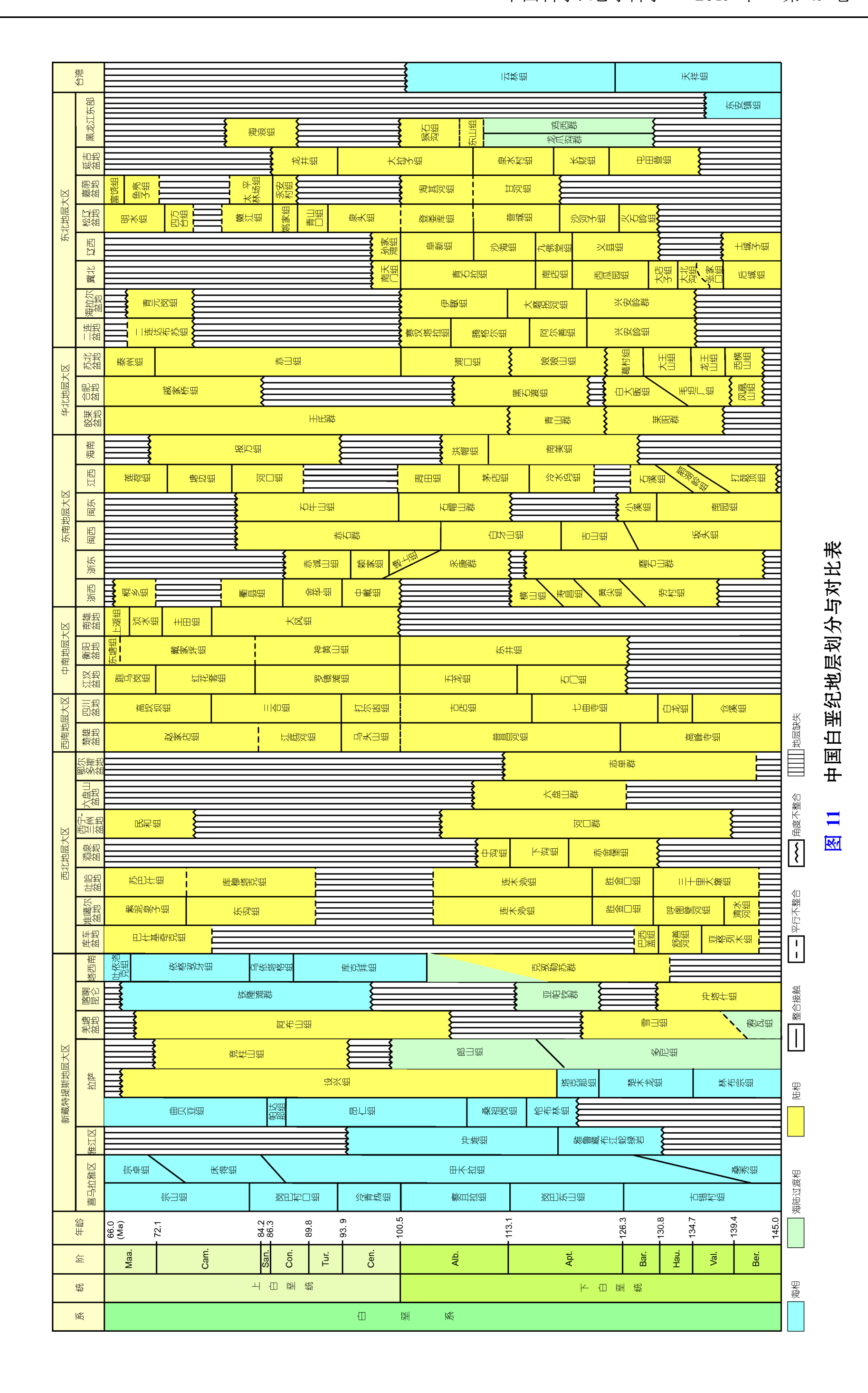


图 11　中国白垩纪地层划分与对比表

年的精度, 加强磁性地层和旋回地层学的研究. 高精度的CA-ID-TIMS锆石U-Pb定年应该受到重视.

(3) 以生物地层为基础, 综合同位素年代学、磁性地层学、旋回地层学和化学地层学等方法, 开展综合地层划分与对比. 注重在中国-地时(Earth Time-China)的指导下, 用国际标准的测年方法去获得和筛选一批高质量的年龄数据, 将同位素年代与磁性地层、生物地层和旋回地层相结合, 提高地层划分与对比精度. 中国陆相阶应该注意与国际海相阶的接轨, 在精确年代地层格架的基础上, 提高生物地层划分与对比精度, 建立与海相阶相对应的陆相阶的生物和其他标志.

(4) 加强重要地层界线和地质事件的研究. 侏罗系/白垩系界线长期悬而未决, 随着土城子组生物年代地层工作的扩展, 有可能在中国陆相J/K界线研究方面取得突破, 我国西南地区的盆地亦有潜力取得进展. 中国白垩纪/古近纪界线(K/Pg)研究进展总体较好, 松辽盆地和嘉荫盆地已经完成多学科的陆相界线划分, 有望进一步获得准确的界线位置, 其他如南雄盆地、苏北盆地、江汉盆地、胶莱盆地等, 均具有很好的研究潜力. 松辽盆地和辽西地区陆相白垩纪地层发育, 是研究白垩纪超静磁带(CNS)开始和结束时间的理想地区, 同时也有望确定Aptian阶和Campanian阶在陆相地层中的标志.

(5) 我国陆相地层保存了热河生物群、松花江生物群、明水生物群(嘉荫生物群), 大量的恐龙动物群等丰富的白垩纪陆相生物记录, 也记录了燕山运动、东部火山喷发和湖泊缺氧等一系列重大地质事件, 加强上述生物和地质事件时空分布和横向上的对比, 使其从区域研究扩展到洲际对比.

致谢 承蒙周忠和院士、王永栋研究员和许克明教授审阅全文, 提出了宝贵的修改意见; 论文撰写中, 贺怀宇研究员、吴怀春教授、孙跃武教授、Benjamin Sames博士、沈阳博士和江湉博士提出了有益建议; 研究生覃祚焕、史忠叶、俞志强、卡木然、崔璨、王冠男、熊昕、孙燕琪、顾安琪、叶蕴琪、王雪娇和吴宝旭参与了部分章节的修改, 本文作者一并表示感谢. 感谢沈树忠院士和戎嘉余院士的约稿, 及其对本文编写所提供的指导.

参考文献

蔡正全, 俞云文. 2001. 浙江白垩系上部地层的划分与对比. 地层学杂志, 25: 259–266

曹光跃, 薛怀民, 王金光. 2014. 郯庐断裂山东段(胶东)中生代中酸性火山岩的锆石U-Pb年代学及地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 33: 1019–1038

曹珂. 2013. 中国陆相白垩系地层对比. 地质论评, 59: 24–40

陈金华, 黎文本, 曹美珍, 曹正尧, 刘兆生, 肖书海. 2001. 非海相白垩系. 见: 周志毅, 主编. 塔里木盆地各纪地层. 北京: 科学出版社. 261–279

陈丕基. 1975. 云南的白垩系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 云南中生代地层. 北京: 科学出版社. 31–48

陈丕基. 1988. 热河动物群的分布与迁移: 兼论中国陆相侏罗系-白垩系界线划分. 古生物学报, 27: 659–683

陈丕基. 1989. 华南白垩系的划分与对比. 见: 陈丕基, 徐克定, 陈金华, 主编. 南方白垩系会议论文集. 南京: 南京大学出版社. 25–40

陈丕基. 2000a. 陆相白垩系. 见: 南京地质古生物研究所, 主编. 中国地层研究二十年(1979–1999). 合肥: 中国科学技术大学出版社. 329–346

陈丕基. 2000b. 中国陆相侏罗、白垩系划分对比述评. 地层学杂志, 24: 114–119

陈丕基. 2012. 中国白垩纪叶肢介生物地层学. 地层学杂志, 36: 300–313

陈丕基, 金帆. 1999. 热河动物群. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 342

陈丕基, 黎文本, 陈金华, 叶春辉, 王振, 沈炎彬. 1982. 中国侏罗、白垩纪的地层划分.中国科学B辑, 7: 651–664

陈丕基, 施泽龙, 叶宁, 叶得泉. 1998. 松花江生物群与东北白垩系地层序列. 古生物学报, 37: 122–127

陈丕基, 万晓樵, 刘耕武, 曹美珍, 李罡, 曹流. 2012. 富饶阶的时代归属. 地层学杂志, 36: 764–772

陈丕基, 袁凤钿. 1993. 秦岭、大别山区的热河动物群与中生代地层和构造发育史浅析. Palaeoworld, 2: 25–40

程金辉, 何承全. 2012. 非海相白垩纪沟鞭藻生物地层学. 地层学杂志, 36: 229–240

戴霜, 朱强, 胡鸿飞, 唐玉虎, 黄永波, 刘俊伟, 孔立, 方小敏. 2009. 六盘山群磁性地层年代. 地层学杂志, 33: 188–192

邓胜徽, 卢远征. 2008. 甘肃酒泉盆地早白垩世植物化石及其古气候意义. 地质学报, 82: 104–114

邓胜徽, 卢远征, 樊茹, 李鑫, 方琳浩, 刘璐. 2012. 中国白垩纪植物群与生物地层学. 地层学杂志, 36: 241–265

丁保良, 李耀西, 汪迎平, 冯宁生, 蓝瑛, 蓝善先. 2010. 浙江白垩系综合地层学研究与进展. 地质出版社. 171

董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81: 1449–1461

段政, 邢光福, 余明刚, 赵希林, 靳国栋, 陈志洪. 2013. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析. 地质论评, 59: 454–469

方培岳, 李罡. 2015. 西藏南部江孜地区甲不拉组底栖有孔虫动物群的发现. 微体古生物学报, 32: 339–349
符国祥. 1995. 海南岛中生代红色盆地地层. 地层学杂志, 19: 115–143
葛同明, 刘坚, 樊利民, 钟水仙, 吴能友. 1994. 衡阳盆地红层的磁性地层学研究, 地质学报, 68: 379–388
顾知微. 1962. 全国地层会议学术报告汇编中国的侏罗系和白垩系. 北京: 科学技术出版社. 84
顾知微. 1983. 论我国非海相侏罗系和白垩系的分界. 见: 中国科学南京地质古生物研究所, 主编. 中国各纪地层界线研究. 北京: 科学出版社. 65–82
郭宪璞. 1990. 塔里木盆地西部海相白垩系-第三系界线划分的研究. 地球科学, 15: 325–335
郭宪璞, 王大宁, 丁孝忠, 宗文明, 周玮. 2011. 塔里木盆地北部早-中白垩世孢粉时代和生物地理区系研究新进展. 地质论评, 57: 870–880
郝诒纯, 郭宪璞, 叶留生, 姚培毅, 付德荣, 李汉敏, 阮培华. 2001. 塔里木盆地西南地区海相白垩系-第三系界线. 北京: 地质出版社. 108
郝诒纯, 苏德英, 李友桂, 余静贤, 张望平, 李佩贤, 齐骅, 关绍曾, 郭福祥. 1982a. 论中国非海相白垩系的划分及侏罗白垩系的分界. 地质学报, 56: 187–199
郝诒纯, 苏德英, 余静贤, 李佩贤, 李友桂, 王乃文, 齐骅, 关绍曾, 张华光, 刘训, 杨文达, 叶留生, 寿志熙, 张清波. 1986. 中国地层12: 中国的白垩系. 北京: 地质出版社. 301
郝诒纯, 苏德英, 余静贤, 李友桂, 张望平, 刘桂芳. 2000a. 中国地层典: 白垩系. 北京: 地质出版社. 124
郝诒纯, 苏新, 郭宪璞, 丁孝忠. 2000b. 塔北库车前陆盆地晚白垩世钙质超微化石的首次发现. 现代地质, 14: 246–246
郝诒纯, 万晓樵. 1985. 西藏定日地区的海相白垩、第三系. 见: 地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 主编. 青藏高原地质文集, 16: 227–232
郝诒纯, 曾学鲁, 李汉敏. 1982b. 塔里木盆地西部晚白垩世-第三纪地层及有孔虫. 地球科学, 1: 1–142
何承全. 1991. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪沟鞭藻及其它藻类. 北京: 科学出版社. 235
侯佑堂, 勾韵娴. 2007. 中国介形类化石(第二卷). 北京: 科学出版社. 798
侯佑堂, 勾韵娴, 陈德琼. 2002. 中国介形类化石(第一卷). 北京: 科学出版社. 1090
胡艳霞, 徐东来. 2005. 甘肃玉门下沟地区早白垩世下沟组介形类. 微体古生物学报, 22: 173–184
黄清华, 陈春瑞, 王平在, 韩敏欣, 李星军, 伍大庆. 1998. 松辽盆地晚白垩世生物演化与古湖泊缺氧事件. 微体古生物学报, 15: 417–425
黄清华, 吴怀春, 万晓樵, 贺怀宇, 邓成龙. 2011. 松辽盆地白垩系综合年代地层学研究新进展. 地层学杂志, 35: 250–257
黄永波. 2010. 早白垩世鄂尔多斯南部沙漠起源与演化: 志丹群磁性地层年代及沉积物磁化率测量. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学. 1–78
胡广, 胡文麄, 曹剑, 姚素平, 王学寅, 刘友祥. 2011. 闽西下白垩统坂头组锆石 U-Pb年龄及地层对比. 地球科学进展, 26: 933–943
季强. 2017. 鲁东地区白垩纪地层格架及白垩系与古近系分界问题的探讨. 地质科学, 41: 1–25
季强, 陈文, 王五力, 金小赤, 张建平, 柳永清, 张宏, 姚培毅, 姬书安, 袁崇喜, 张彦, 尤海鲁. 2004. 中国辽西中生代热河生物群. 北京: 地质出版社. 375
季强, 柳永清, 姬书安, 陈文, 吕君昌, 尤海鲁, 袁崇喜. 2006. 论中国陆相侏罗系-白垩系界线. 地质通报, 25: 336–339
江德昕, 王永栋, 何卓生, 董凯林, 倪庆, 田宁. 2006. 新疆塔里木盆地早白垩世克孜勒苏群孢粉组合. 微体古生物学报, 23: 371–291
姜宝玉, 姚小刚, 牛亚卓, 饶馨, 李启剑. 2010. 辽宁西部侏罗系与白垩系概览. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 85
蒋维三, 甄金生, 李龙通, 徐克定. 1993. 浙江白垩系研究. 南京: 南京大学出版社. 188
康志强, 许继峰, 王保弟, 董彦辉, 王树庆, 陈建林. 2009. 拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学: 形成的构造环境. 地球科学——中国地质大学学报, 34: 89–104
旷红伟, 柳永清, 刘燕学, 彭楠, 许欢, 董超, 陈军, 刘海, 徐加林, 薛沛霖. 2013. 兴蒙造山区及邻区早白垩世盆地岩石地层格架与沉积古地理演化. 地质通报, 32: 1063–1084
蓝琇, 魏景明. 1995. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪双壳类动物群. 北京: 科学出版社. 212
李华亮, 高成, 李正汉, 张璋, 彭智敏, 关俊雷. 2016. 西藏班公湖地区竟柱山组时代及其构造意义. 大地构造与成矿学, 40: 663–673
李建国, 杜宝安. 2006. 甘肃平凉安国镇白垩系六盘山群的孢粉植物群. 古生物学报, 45: 498–513
李国彪, 潘懋, 万晓樵, 谢丹, 修迪, 李兴鹏, 高茂龙, 耿彦杰. 2012. 论西藏扎达上白垩统波林夏拉组. 地层学杂志, 36: 37–48
李莎, 高琴琴, 张翼翼, 屈海英, 王曼艳, 万晓樵. 2013. 松科1井(北孔)晚白垩世晚期至古新世早期轮藻化石组合. 微体古生物学报, 30: 1–16
李伟同, 刘耕武, Dennis R B, 李艺斌, 曹卫生, Don B, 沈娇, 陈钦保. 2014. 中国新生界第一阶潜在的层型剖面. 中国科学: 地球科学, 44: 634–641
黎文本. 2001. 从孢粉组合论证松辽盆地泉头组的地质时代及上、下白垩统界线. 古生物学报, 40: 153–176
李献华, 李武显, 陈丕基, 万晓樵, 李罡, 宋彪, 姜剑虹, 刘吉才, 尹德顺, 阎伟. 2004. 黑龙江富饶组上段凝灰岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄: 一个最接近陆相白垩/第三系界线年龄的数据. 科学通报, 49: 816–818
李祥辉, 张朝凯, 王尹, 刘玲. 2018. 华南晚中生代陆相地层年代及关

系研究. 地质学报, 92: 1107–1130
林妙琴, 李建国, 彭俊刚. 2016. 辽西北票四合屯早白垩世土城子组三段孢粉组合及其意义. 微体古生物学报, 33: 261–271
刘桂芳. 1988. 西藏聂拉木古错地区晚侏罗世至早白垩世菊石群. 见: 中国地质科学院, 主编. 西藏古生物论文集. 北京: 地质出版社. 1–65
刘桂芳, 王思恩. 1987. 西藏喜马拉雅区上侏罗统和下白垩统研究的新进展. 见: 中国地质科学院地层古生物论文集编委会, 主编. 地层古生物论文集(17). 北京: 地质出版社. 143–166
柳永清, 旷红伟, 姬书安, 吕君昌, 刘燕学, 江小均, 彭楠, 陈铭培, 李家华. 2009. 晚中生代地球表层重大地质事件的陆地环境剧变与生物群演替响应. 地学前缘, 16: 37–47
柳永清, 旷红伟, 彭楠, 许欢, 刘燕学. 2011. 山东胶莱盆地白垩纪恐龙足迹与骨骼化石埋藏沉积相与古地理环境. 地学前缘 18: 9–24
柳永清, 李佩贤, 田树刚. 2003. 冀北滦平晚中生代火山碎屑(熔)岩中锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22: 237–244
马之力, 李建华, 张岳桥, 董树文, 宋传中, 李勇. 2016. 浙江南部丽水盆地地层时代及构造演化. 中国地质, 43: 56–71
牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2003. 张家口组火山岩SHRIMP定年及其重大意义. 地质通报, 22: 140–141
潘华璋. 2012. 中国非海相白垩纪腹足类组合序列和分布. 地层学杂志, 36: 344–356
潘华璋, 杨胜秋, 孙东立. 1991. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪腹足类、海胆和腕足类. 北京: 科学出版社. 150
潘永信, 朱日祥, Shaw J, 周姚秀. 2001. 辽西四合屯含化石层古地磁极性年龄的初步确定. 科学通报, 46: 680–684
彭守涛, 李忠, 黄宝春, 刘涛, 王清晨. 2005. 库车坳陷北部白垩系磁性地层划分. 科学通报, 50: 2136–2144
全国地层委员会. 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书. 北京: 地质出版社. 72
全国地层委员会. 2018. 中国地层表(2014)说明书. 北京: 地质出版社. 488
齐骅. 1988. 宁夏固原六盘山群上部的介形类化石. 见: 中国地质科学院地层古生物论文集编委会, 主编. 地层古生物论文集(22). 北京: 地质出版社. 85–137
沙金庚. 1990. 黑龙江省东部Aucellina(双壳类)的发现. 地层学杂志, 14: 226–230
沙金庚, Lucas S G. 2012. 非海白垩系相年代学和对比. 地层学杂志, 36: 137–152
秦华峰, 潘永信, 贺怀宇, 杨列坤, 朱日祥. 2016. 胶东半岛黄崖剖面早白垩世火山岩古地磁结果及其构造意义. 岩石学报, 32: 3205–3213
覃祚焕, 席党鹏, 徐延康, 魏丰, 丁聪, 俞志强, 万晓樵. 2017. 冀北滦平盆地榆树下剖面大北沟组岩石地层、生物地层及其地质年代探讨. 地学前缘, 24: 78–105
宋之琛, 尚玉珂. 2000. 中国孢粉化石(第二卷): 中生代孢粉. 北京: 科学出版社. 710
孙革. 2014. 黑龙江嘉荫晚白垩世-古新世生物群、K-Pg界线及恐龙灭绝. 上海科技教育出版社. 194
孙立新, 赵凤清, 王惠初, 谷永昌, 冀世平. 2007. 燕山地区土城子组划分、时代与盆地性质探讨. 地质学报, 81: 445–453
Swisher C C III, 汪筱林, 周忠和, 王元青, 金帆, 张江永, 徐星, 张福成, 王原. 2001. 义县组同位素年代新证据及土城子组40Ar/39Ar年龄测定. 科学通报, 46: 2009–2012
唐天福, 杨恒仁, 蓝琇, 俞从流, 薛耀松, 张一勇, 魏景明, 胡兰英, 钟石兰. 1989. 新疆塔里木盆地西部白垩纪至早第三纪海相地层及含油性. 北京: 科学出版社. 155
唐玉虎. 2008. 兰州-民和盆地早白至世磁性地层年代与青藏高原北部隆升. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学. 1–80
田树刚, 庞其清, 牛绍武, 李佩贤, 柳永清. 2004. 冀北滦平盆地陆相侏罗系-白垩系界线候选层型剖面初步研究. 地质通报, 23: 1170–1179
童永生, 李茜, 王元青. 2013. 中国早古近纪陆相地层划分框架研究. 地层学杂志, 37:428–440
万晓樵. 1987. 西藏第三纪有孔虫生物地层及地理环境. 现代地质, 1: 17–49
万晓樵. 1990. 西藏白垩纪-早第三纪有孔虫与特提斯–喜马拉雅海的演化. 微体古生物学报, 7: 169–186
万晓樵, 高莲凤, 李国彪, 陈文, 张彦. 2005. 西藏江孜–浪卡子一带的侏罗-白垩纪界线地层. 现代地质, 19: 479–487
万晓樵, 高莲凤, 覃祚焕, 崔璨, 李玮, 席党鹏. 2016. 侏罗系、白垩系界线问题及对中国北方陆相界线的思考. 地学前缘, 23: 312–322
万晓樵, 李罡, 黄清华, 席党鹏, 陈丕基. 2013. 中国白垩系陆相阶的划分与对比. 地层学杂志, 37: 457–471
万晓樵, 孙立新, 刘文灿, 李国彪. 2007. 西藏雅鲁藏布江缝合带地层. 北京: 地质出版社. 119
万晓樵, 王成善, 吴怀春, 张世红. 2014. 从地层到地时. 地学前缘, 21: 1–7
万晓樵, 吴怀春, 席党鹏, 刘美羽, 覃祚焕. 2017. 中国东北地区白垩纪温室时期陆相生物群与气候环境演化. 地学前缘, 24: 18–31
万晓樵, 赵文金, 李国彪. 2000. 对西藏岗巴晚白垩世地层的新认识. 现代地质, 14: 181–185
王成善, 胡修棉. 2005. 白垩纪世界和大洋红层. 地学前缘, 12: 11–21
王启飞, 陈丕基. 2005. 白垩纪年代地层学研究简述. 地层学杂志, 29: 114–123
王启飞, 高琴琴, 卢辉楠, 曹美珍, 彭金兰. 2000. 关于库车巴什基奇克组时代的讨论. 地层学杂志, 25: 299–302
王启飞, 杨景林, 卢辉楠. 2003. 甘肃高台早白垩世下沟组轮藻化石. 微体古生物学报, 20: 187–198
王非, 杨列坤, 王磊, 沈加林, 邢光福, 陈荣, 潘永信, 朱日祥. 2010. 中国东南晚中生代火山沉积地层界线时代——$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学及

磁性地层研究. 中国科学: 地球科学, 40: 1552–1570
王思恩. 1985. 中国地层 11 中国的侏罗系. 北京: 地质出版社. 350
王思恩, 1990. 热河动物群的起源、演化与机制. 地质学报, 64: 350–360
王思恩, 高林志, 万晓樵, 宋彪. 2013. 辽西-冀北地区土城子组生物地层、磁性地层、同位素测年与国际对比及其对年代的制约. 地质通报, 32: 1673–1690
王松山, 王元青, 胡华光, 李惠民. 2001. 辽西四合屯脊推动物生存时代: 锆石U-Pb年龄证据. 科学通报, 46: 330–333
王薇, 朱光, 张帅, 刘程, 顾承串. 2017. 合肥盆地中生代地层时代与源区的碎屑锆石证据. 地质论评, 63: 955–977
汪筱林, 王强, 蒋顺兴, 程心, 张嘉良, 赵资奎, 蒋严根. 2012. 中国晚白垩世陆相红层与恐龙蛋化石群序列及其地层学意义. 地层学杂志, 36: 400–416
王五力, 张宏, 张立君, 郑少林, 杨芳林, 李之彤, 郑月娟, 丁秋红. 2004. 土城子阶、义县阶: 标准地层剖面及其地层古生物、构造-火山作用. 北京: 地质出版社. 514
王五力, 郑少林, 张立君, 蒲荣干, 张武, 吴洪章, 具然弘, 董国义, 元红. 1989. 辽宁西部中生代地层古生物(1). 北京: 地质出版社. 168
汪筱林, 王元青, 张福成, 张江永, 周忠和, 金帆, 胡耀明, 顾罡, 张海春. 2000. 辽宁凌源及内蒙古宁城地区下白垩统义县组脊椎动物生物地层. 古脊椎动物学报, 38: 81–99
王永栋, 田宁, 蒋子堃, 杨小菊, 丁秋红. 2017. 中国中生代木化石研究新进展: 多样性变化及古气候波动. 地学前缘, 24: 52–64
文世宣. 1974. 珠穆朗玛峰地区的地层·白垩系. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966–1968) 地质. 北京: 科学出版社. 148–183
文世宣, 沙金庚, 章炳高, 蔡华伟. 2000. 陆相白垩系. 见: 南京地质古生物研究所, 主编. 中国地层研究二十年(1979–1999). 合肥: 中国科学技术大学出版社. 315–328
吴浩若. 2010. 西藏南部和地中海西部白垩纪中期放射虫化石的对比. 微体古生物学报, 27: 299–304
巫建华, 周维勋, 张邦桐. 2002. 江西及广东北部中生代晚期地层层序和时代 — 兼论《江西省岩石地层》中存在的问题. 地质论评, 48: 44–53
席党鹏, 万晓樵, 冯志强, 李顺, 冯子辉, 贾建忠, 荆夏, 司伟民. 2010. 松辽盆地晚白垩世有孔虫的发现: 来自松科1井湖海沟通的证据. 科学通报, 55: 3433–3436
邢光福, 郑剑波, 沈加林, 江茂求, 钱迈平, 姜杨, 靳国栋, 段政. 2013. 福建泰宁世界地质公园丹霞红层研究. 地层学杂志, 37: 18–24
徐钰林, 万晓樵, 苟忠海, 张启华. 1990. 西藏侏罗、白垩、第三纪生物地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 147
闫峻, 陈江峰, 谢智, 周泰禧. 2003. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据. 科学通报, 48: 1570–1574
杨恒仁, 蒋显庭, 林树鑿. 1995. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪介形类动物群. 北京: 科学出版社. 173
杨景林, 王启飞, 卢辉楠. 2008. 准噶尔盆地白垩纪轮藻化石组合序列. 微体古生物学报, 25: 345–363
杨景林, 沈一新. 2004. 准噶尔盆地南缘紫泥泉子组的时空展布及成因解释. 地层学杂志, 28: 215–222
杨平, 张道伟, 袁秀军. 2011. 柴达木盆地地层研究现状及其发展方向. 青海石油, 27: 1–7
杨小菊, 李建国. 2016. 西藏拉萨早白垩世种子蕨一新种. 古生物学报, 55: 467–472
杨遵仪, 程裕淇, 王鸿祯. 1989. 中国地质. 武汉: 中国地质大学出版社. 275
叶得泉, 钟筱春. 1990. 中国北方含油气区白垩系. 北京: 石油工业出版社. 354
叶得泉, 黄清华, 张莹, 陈春瑞. 2002. 松辽盆地白垩纪介形类生物地层学. 北京: 石油工业出版社. 312
尹济云, 孙知明, 杨振宇, 梁其中. 1999. 滇西兰坪盆地白至纪-早第三纪古地磁结果及其地质意义. 地球物理学报, 42: 648–659
阴家润. 2016. 西藏喜马拉雅晚侏罗世-早白垩世菊石. 北京: 地质出版社. 308
尤海鲁, 李大庆, 周伶琦, 季强. 2006. 刘家峡黄河巨龙: 中国甘肃兰州盆地下白垩统河口群一新蜥脚类恐龙化石. 地质论评, 52: 668–674
赵磊, 高福红, 张彦龙, 徐怀民, 张丽媛. 2013. 海拉尔盆地中生代火山岩锆石U-Pb年代学及其地质意义. 岩石学报, 29: 864–874
赵文金, 万晓樵. 2003. 西藏特提斯演化晚期生物古海洋事件. 北京: 地质出版社. 116
赵自强, 丁启秀. 1996. 全国地层多重划分对比研究——中南区区域地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 197
张宏, 柳小明, 张晔卿, 袁洪林, 胡兆初. 2005. 冀北滦平-辽西凌源地区张家口组火山岩顶、底的单颗粒锆石U-Pb测年及意义. 地球科学-中国地质大学学报, 30: 387–401
张明震, 戴霜, 张永全, 苗运法, 刘俊伟, 黄永波, 赵杰, 刘学. 2012. 六盘山地区寺口子剖面早白垩世晚期的孢粉组合及其环境意义.干旱区地理, 35: 99–108
张弥曼, 陈丕基, 王元青, 王原. 2001, 热河生物群. 上海: 上海科学技术出版社. 150
张国全, 王勤生, 俞跃平, 杨超, 肖娟. 2012. 浙江东部火山岩地区的地层时代和划分. 地层学杂志, 36: 641–652
张显球, 李罡. 2015. 南雄盆地上湖组坪岭段的时代讨论. 地层学杂志, 39: 74–80
张显球, 张喜满, 侯明才, 李罡, 黎汉明. 2013. 南雄盆地红层岩石地层划分. 37: 441–451
张一勇, 李建国. 2000. 江苏白垩纪孢粉组合序列. 地层学杂志, 24: 65–71
张嘉良, 王强, 蒋顺兴, 程心, 李宁, 裘锐, 张鑫俊, 汪筱林. 2017. 山东莱阳晚白垩世恐龙与恐龙蛋研究历史和新进展. 古脊椎动物学报, 55: 187–200

张清如. 2009. 中南地区白垩纪-新近纪孢粉化石组合序列的初步总结. 武汉: 中国地质大学出版社. 624
赵资奎, 毛雪瑛, 柴之芳, 杨高创, 张福成, 严正. 2009. 广东省南雄盆地白垩纪-古近纪(K/T)过渡时期地球化学环境变化和恐龙灭绝: 恐龙蛋化石提供的证据. 科学通报, 54: 201–209
赵资奎, 叶捷, 王强. 2017. 南雄盆地白垩纪-古近纪交界恐龙灭绝和哺乳动物复苏. 科学通报, 62: 1869–1881
赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11: 319–328
郑春子, 曲永贵, 张树岐, 刘贵忠, 冯德臣. 2003. 西藏北部雄梅-曲松波地区早白垩世多尼组及沉积环境探讨. 地质论评, 49: 638–645
郑克丽. 2012. 福建晚中生代火山地层研究新进展. 福建地质, 4: 325–335
郑秀亮, 郑秀梅, 郑新生, 李建国, 杨玉梅, 翁月新, 吴采西. 2013. 准噶尔盆地晚白垩世介形类化石组合. 地层学杂志, 37: 206–209
钟石兰. 1992. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪钙质超微化石(颗石藻类). 北京: 科学出版社. 121
周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, 杨西飞, Cooke D R. 2011. 宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义. 中国科学: 地球科学, 41: 960–971
周山富, 高嘉青, 王伟铭, 吴聿元, 杨学英. 2009. 江苏白垩系及其被子植物花粉和演化. 杭州: 浙江大学出版社. 470
周忠和, 贺怀宇, 汪筱林. 2009. 侏罗系-白垩系的界线和我国东北地区下白垩统陆相地层相关问题的探讨. 古生物学报, 48: 541–555
周忠和, 王原. 2010. 热河生物群脊椎动物生物多样性的分析以及与其他动物群的比较. 中国科学: 地球科学, 40: 1250–1265
朱丽霞, 谭富文, 付修根, 陈 明, 冯兴雷, 曾胜强. 2012. 北羌塘盆地晚中生代地层: 早白垩世海相地层的发现. 沉积学报, 30: 825–833
朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41: 583–592
庄忠海, 蒋兴治, 马醒华, 任希飞, 徐树金, 田端孝. 1988. 四川盆地雅安至天全白垩系-下第三系古地磁研究. 物探与化探, 12: 224–228
Amiot R, Wang X, Zhou Z, Wang X, Buffetaut E, Lécuyer C, Ding Z, Fluteau F, Hibino T, Kusuhashi N, Mo J, Suteethorn V, Wang Y, Xu X, Zhang F. 2011. Oxygen isotopes of East Asian dinosaurs reveal exceptionally cold Early Cretaceous climates. Proc Natl Acad Sci USA, 108: 5179–5183
Boudagher–Fadel M K, Hu X M, Prince G D, Sun G Y, Wang J G, An W. 2017. Foraminiferal biostratigraphy analysis of the mid-Cretaceous limestones in the southern Tibetan plateau. J Foraminiferal Res, 47: 188–207
Cande S C, Kent D V. 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. J Geophys Res, 100: 6093–6095
Chamberlain C P, Wan X, Graham S A, Carroll A R, Doebbert A C, Sageman B B, Blisniuk P, Kent-Corson M L, Wang Z, Chengshan W. 2013. Stable isotopic evidence for climate and basin evolution of the Late Cretaceous Songliao basin, China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 385: 106–124
Chang S C, Gao K Q, Zhou C F, Jourdan F. 2017. New chronostratigraphic constraints on the Yixian Formation with implications for the Jehol Biota. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 487: 399–406
Chang S, Zhang H, Renne P R, Fang Y. 2009. High-precision $^{40}Ar/^{39}Ar$ age for the Jehol Biota. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 280: 94–104
Chen D, Zhang F, Tian Y, Zhou Z, Dilek Y, Chen H, Zhang K, Zhao X. 2018. Timing of the late Jehol Biota: New geochronometric constraints from the Jixi Basin, NE China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 492: 41–49
Chen P J. 1983. A survey of the non-marine Cretaceous of China. Cretaceous Res, 4: 124–143
Chen P J. 2003. Cretaceous biostratigraphy of China. In: Zhang, W T, Chen P J, Palmer A R, eds. Biostratigraphy of China. Beijing: Science Press. 465–532
Chen P J, Dong Z M, Zhen S N. 1998. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China. Nature, 391: 147–152
Clyde W C, Ting S, Snell K E, Bowen G J, Tong Y, Koch P L, Li Q, Wang Y. 2010. New paleomagnetic and stable-isotope results from the Nanxiong Basin, China: Implications for the K/T boundary and the timing of Paleocene mammalian turnover. J Geol, 118: 131–143
Davis G A. 2005. The Late Jurassic “Tuchengzi/Houcheng” Formation of the Yamhan fold-thrust belt: An analysis. Earth Sci Front, 12: 331–345
Deng C L, He H Y, Pan Y X, Zhu R X. 2013. Chronology of the terrestrial Upper Cretaceous in the Songliao Basin, northeast Asia. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 385: 44–54
Eberth D A, Russell D A, Braman D R, Deino A L. 1993. The age of the dinosaur-bearing sediments at Tebch, Inner Mongolia, People's Republic of China. Can J Earth Sci, 30: 2101–2106
Ding Q, Tian N, Wang Y, Jiang Z, Chen S, Wang D, Zhang W, Zheng S, Xie A, Zhang G, Liu Z. 2016. Fossil coniferous wood from the Early Cretaceous Jehol Biota in western Liaoning, NE China: New material and palaeoclimate implications. Cretac Res, 61: 57–70
Gao Y, Ibarra D E, Wang C, Caves J K, Chamberlain C P, Graham S A, Wu H. 2015. Mid-latitude terrestrial climate of East Asia linked to global climate in the Late Cretaceous. Geology, 43: 287–290
Grabau A W. 1928. Stratigraphy of China. Beijing: Geological Survey of China. 774
Haq B U. 2014. Cretaceous eustasy revisited. Glob Planet Change, 113: 44–58

Hardenbol J, Thierry J, Farley M B, Jacquint T, de Graciansky P, Vail P. 1998. Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European Basins. In: de Graciansky P, Hardenbol J, Jacquin T, Vail P R, eds. Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. SEPM Spec Publ, 60: 3–13

Hay W W. 2017. Toward understanding Cretaceous climate—An updated review. Sci China Earth Sci, 60: 5–19

He H Y, Deng C L, Wang P J, Pan Y X, Zhu R X. 2012. Toward age determination of the termination of the Cretaceous Normal Superchron. Geochem Geophys Geosyst, 13: 1–8

He H, Pan Y, Tauxe L, Qin H, Zhu R. 2008. Toward age determination of the M0r (Barremian-Aptian boundary) of the Early Cretaceous. Phys Earth Planet Inter, 169: 41–48

He H Y, Wang X L, Zhou Z H, Wang F, Boven A, Shi G H, Zhu R X. 2004. Timing of the Jiufotang Formation (Jehol Group) in Liaoning, northeastern China, and its implications. Geophys Res Lett, 31: L12605

He H Y, Wang X L, Jin F, Zhou Z H, Wang F, Yang L K, Ding X, Boven A, Zhu R X. 2006a. The $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of the early Jehol biota from Fengning, Hebei Province, northern China. Geochem Geophys Geosyst, 7: 1–8

He H, Wang X, Wang Q, Jiang S, Cheng X, Zhang J, Zhou Z, Zhao Z, Jiang Y, Yu F, Deng C, Yang J, Zhu R. 2013. SIMS zircon U-Pb dating of the Late Cretaceous dinosaur egg-bearing red deposits in the Tiantai Basin, southeastern China. J Asian Earth Sci, 62: 654–661

He H Y, Wang X L, Zhou Z H, Jin F, Wang F, Yang L K, Ding X, Boven A, Zhu R X. 2006b. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of Lujiatun Bed (Jehol Group) in Liaoning, northeastern China. Geophys Res Lett, 33: L04303

Hu X M, Jansa L, Wang C S, Sarti M, Bak K, Wagreich M, Michalik J, Soták J. 2005. Upper Cretaceous Oceanic Red Beds (CORB) in the Tethys: Occurrence, lithofacies, age and environment. Cretaceous Res, 26:3–20

Hu X, Scott R W, Cai Y, Wang C, Melinte-Dobrinescu M C. 2012. Cretaceous oceanic red beds (CORBs): Different time scales and models of origin. Earth-Sci Rev, 115: 217–248

Huber B T, Norris R D, MacLeod K G. 2002. Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous. Geology, 30: 123–126

Ji Q, Currie P J, Norell M A, Ji S A. 1998. Two feathered dinosaurs from northeastern China. Nature, 393: 753–761

Jiang S H, Bagas L, Liang Q L. 2015. New insights into the petrogenesis of volcanic rocks in the Shanghang Basin in the Fujian Province, China. J Asian Earth Sci, 105: 48–67

Jenkyns H C. 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events. Geochem Geophys Geosyst, 11: Q03004

Kennedy J, Gale A, Huber B, Petrizzo M, Bown P, Jenkyns H. 2017. The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Albian Stage, of the Cretaceous, the Col de Pré-Guittard section, Arnayon, Drôme, France. Episodes, 40: 177–188

Leckie R M, Bralower T J, Cashman R. 2002. Oceanic anoxic events and plankton evolution: Biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. Paleoceanography, 17: 13-1–13-29

Leier A L, Kapp P, Gehrels G E, DeCelles P G. 2007. Detrital zircon geochronology of Carboniferous? Cretaceous strata in the Lhasa terrane, Southern Tibet. Basin Res, 19: 361–378

Li G. 2017. SEM morphological study of the type species of Ordosestheria Wang, 1984 (Spinicaudata) from Ordos Basin of mid-west China. Cretac Res, 75: 1–6

Li G, Bengtson P. 2018. Early Cretaceous ammonites from eastern Heilongjiang, northeastern China, and their chronostratigraphical significance. Cretac Res, 88: 197–209

Li G, Matsuoka A. 2015. Searching for a non-marine Jurassic/Cretaceous boundary in northeastern China. J Geol Soc Japan, 121: 109–122

Li G, Ohta T, Batten D J, Sakai T, Kozai T. 2016. Morphology and phylogenetic origin of the spinicaudatan Neodiestheria from the Lower Cretaceous Dalazi Formation, Yanji Basin, north-eastern China. Cretac Res, 62: 183–193

Li G, Wan X, Batten D J, Bengtson P, Xi D, Wang P. 2009. Spinicaudatans from the Upper Cretaceous Nenjiang Formation of the Songliao Basin, northeast China: Taxonomy and biostratigraphy. Cretac Res, 30: 687–698

Li G, Yang Q. 2003. Confirmation of an Early Cretaceous age for the Qihulin Formation in eastern Heilongjiang Province, China: Constraints from a new discovery of radiolarians. Cretac Res, 24: 691–696

Li G, Yu S M. 2004. Discovery of agglutinated foraminifers from the Longzhaogou Group in eastern Heilongjiang Province. Sci China Ser D: Earth Sci, 47: 122–127

Li G, Jiang G, Hu X, Wan X. 2009. New biostratigraphic data from the Cretaceous Bolinxiala Formation in Zanda, southwestern Tibet of China, and their paleogeographic and paleoceanographic implications. Cretac Res, 30: 1005–1018

Li J, Batten D J. 2007. Palynological evidence of an Early Cretaceous age for the Yixian Formation at Sihetun, western Liaoning, China. Cretac Res, 28: 333–338

Li J, Batten D J, Zhang Y. 2011. Palynological record from a composite core through Late Cretaceous-early Paleocene deposits in the Songliao Basin, Northeast China and its biostratigraphic implications. Cretac Res, 32: 1–12

Li S, Wang Q, Zhang H, Lu H, Martín-Closas C. 2016. Charophytes from the Cretaceous-Paleogene transition in the Pingyi Basin (Eastern China) and their Eurasian correlation. Cretac Res, 59: 179–200

Li X. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. J Asian Earth Sci, 18: 293–305

Li X, Jenkyns H C, Wang C, Hu X, Chen X, Wei Y, Huang Y, Cui J. 2006. Upper Cretaceous carbon- and oxygen-isotope stratigraphy of hemipelagic carbonate facies from southern Tibet, China. J Geological Soc, 163: 375–382

Li X, Wei Y, Li Y, Zhang C. 2016. Carbon isotope records of the early Albian oceanic anoxic event (OAE) 1b from eastern Tethys (southern Tibet, China). Cretac Res, 62: 109–121

Li Y, He H, Deng C, Pan Y, Ji Q, Wang C, Zheng D, Zhu R. 2018. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating results from the Shijiatun Formation, Jiaolai Basin: New age constraints on the Cretaceous terrestrial volcanic-sedimentary sequence of China. Cretac Res, 86: 251–260

Li Y L, He, J, Wang C S, Santosh M, Dai J G, Zhang Y X, Wei Y S, Wang J G. 2013. Late Cretaceous K-rich magmatism in central Tibet: Evidence for early elevation of the Tibetan plateau? Lithos, 160: 1–13

Li Y L, He J, Wang C S, Han Z P, Ma P F, Xu M, Du K Y. 2015. Cretaceous volcanic rocks in south Qiangtang Terrane: Products of northward subduction of the Bangong-Nujiang Ocean? J Asian Earth Sci, 104: 69–83

Li Y X, Montañez I P, Liu Z H, Ma L F. 2017. Astronomical constraints on global carbon-cycle perturbation during Oceanic Anoxic Event 2 (OAE2). Earth Planet Sci Lett, 462: 35–46

Liang H, Chen X, Wang C, Zhao D, Weissert H. 2016. Methane-derived authigenic carbonates of mid-Cretaceous age in southern Tibet: Types of carbonate concretions, carbon sources, and formation processes. J Asian Earth Sci, 115: 153–169

Liu L, Xu X, Xia Y. 2016. Asynchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: Insights from the episodic Late Mesozoic volcanism. Gondwana Res, 37: 397–407

Liu Z, Liu X, Huang S. 2017. Cyclostratigraphic analysis of magnetic records for orbital chronology of the Lower Cretaceous Xiagou Formation in Linze, northwestern China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 481: 44–56

Liu Y Q, Ji Q, Jiang X J, Kuang H W, Ji S ', Gao L F, Zhang Z G, Peng N, Yuan C X, Wang X R, Xu H. 2013. U-Pb zircon ages of Early Cretaceous volcanic rocks in the Tethyan Himalaya at Yangzuoyong Co Lake, Nagarze, Southern Tibet, and Implications for the Jurassic/Cretaceous boundary. Cretac Res, 40: 90–101

Mao S Z, Norris G. 1988. Late Cretaceous-early Tertiary dinoflagellates and acritarchs from the Kashi area, Tarim Basin, Xinjiang, China. Royal Ontario Museum, Life Science Contributions. 150

O'Brien C L, Robinson S A, Pancost R D, Damsté J S S, Schouten S, Lunt D J, Alsenz H, Bornemann A, Bottini C, Brassell S C, Farnsworth A, Forster A, Huber B T, Inglis G N, Jenkyns H C, Linnert C, Litter K, Markwick P, McAnena A, Mutterlose J, Naafs B D A, Püttmann W, Sluijs A, van Helmonde N A G M, Vellekoop J, Wagner T, Wrobel N. 2017. Cretaceous sea-surface temperature evolution: Constraints from TEX86 and planktonic foraminiferal oxygen isotopes. Earth-Sci Rev, 172: 224–247

Ogg J G, Hinnov L A. 2012. Cretaceous. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, eds. The Geologic Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier. 793–853

Ogg J G, Ogg G, Gradstein F M. 2016. The Concise Geologic Time Scale. Amsterdam: Elsevier. 226

Opdyke N D, Channell J E T. 1996. Late Cretaceous-Cenozoic GPTS. Int Geophys, 64: 113–125

Pan Y, Sha J, Zhou Z, Fürsich F T. 2013. The Jehol Biota: Definition and distribution of exceptionally preserved relicts of a continental Early Cretaceous ecosystem. Cretac Res, 44: 30–38

Qu H, Xi D, Li S, Colin J P, Huang Q, Wan X. 2014. Late Cretaceous–early Paleocene ostracod biostratigraphy of Scientific Drilling Sk1 (N) in the Songliao Basin, northeast China. J Paleontol, 88: 786–799

Rao X, Skelton P W, Sano S I, Li C, Pan Y H, Luo H, Cai H W, Peng B, Sha J G. 2017. Evolution and palaeogeographical dispersion of the radiolitid rudist genus Auroradiolites (Bivalvia, Hippuritida) with descriptions of new material from Tibet and archived specimens from Afghanistan. Papers Palaeontol, 3: 297–315

Rao X, Skelton P W, Sha J, Cai H W, Yasuhiro I. 2015. Mid-Cretaceous rudists (Bivalvia: Hippuritida) from the Langshan Formation, Lhasa block, Tibet. Papers Palaeontol, 1: 401–424

Sames B, Wagreich M, Wendler J E, Haq B U, Conrad C P, Melinte-Dobrinescu M C, Hu X, Wendler I, Wolfgring E, Yilmaz I Ö, Zorina S O. 2016. Review: Short-term sea-level changes in a greenhouse world—A view from the Cretaceous. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 441: 393–411

Scott R W, Wan X, Wang C, Huang Q. 2012. Late Cretaceous chronostratigraphy (Turonian-Maastrichtian): SK1 core Songliao Basin, China. Geol Sci Front, 3: 357–367

Sha J. 2007. Cretaceous stratigraphy of northeast China: non-marine and marine correlation. Cretac Res, 28: 146–170

Sha J G, Chen S W, Cai H W. 2006. Jurassic-Cretaceous boundary in northeastern China: Placement based on buchiid bivalves and dinoflagellate cysts. Pro Natl Sci-Mater Int, 16: 39–49

Sketon P W, Spicer R A, Kelly S P, Gilmour I. 2003. The Cretaceous World. Cambridge: Cambridge University Press. 360

Smith P E, Evensen N M, York D, Chang M M, Jin F, Li J L, Cumbaa

S, Russell D. 1995. Dates and rates in ancient lakes: ^{40}Ar-^{39}Ar evidence for an Early Cretaceous age for the Jehol Group, northeast China. Can J Earth Sci, 32: 1426–1431

Sun Y, Li X, Zhao G, Liu H, Zhang Y. 2016. Aptian and Albian atmospheric CO2 changes during oceanic anoxic events: Evidence from fossil Ginkgo cuticles in Jilin Province, Northeast China. Cretac Res, 62: 130–141

Sun Z, Pei J, Li H, Xu W, Jiang W, Zhu Z, Wang X, Yang Z. 2012. Palaeomagnetism of late Cretaceous sediments from southern Tibet: Evidence for the consistent palaeolatitudes of the southern margin of Eurasia prior to the collision with India. Gondwana Res, 21: 53–63

Swisher C C, Wang Y Q, Wang X L, Xu X, Wang Y. 1999. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. Nature, 400: 58–61

Suzuki S, Sun G, Ulric K. 2011. Radiometric zircon ages of a tuff sample from the Baishantou Member of Wuyun Foamation, Jiayin: A contribution to the search for the K-T boundary in Heilongjiang River area, China. Acta Geol Sin, 85: 1351–1358

Van Itterbeeck J, Horne D J, Bultynck P, Vandenberghe N. 2005. Stratigraphy and palaeoenvironment of the dinosaur-bearing Upper Cretaceous Iren Dabasu Formation, Inner Mongolia, People's Republic of China. Cretac Res, 26: 699–725

Wan X Q. 1991. Albian-Campanian (Cretaceous) planktic foraminiferal stratigraphy in southern Xizang (Tibet). In: Yang Z Y, ed. Stratigraphy and Paleontology of China, Volume 1. Beijing: Geological Publishing House.165–181

Wan X Q, Chen P J, Wei M J, 2007. The Cretaceous system in China. Acta Geol Sin, 81: 957–983

Wan X, Wignall P B, Zhao W. 2003. The Cenomanian-Turonian extinction and oceanic anoxic event: Evidence from southern Tibet. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 199: 283–298

Wan X, Zhao J, Scott R W, Wang P, Feng Z, Huang Q, Xi D. 2013. Late Cretaceous stratigraphy, Songliao Basin, NE China: SK1 cores. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 385: 31–43

Wang C, Hu X, Sarti M, Scott R W, Li X. 2005. Upper Cretaceous oceanic red beds in southern Tibet: A major change from anoxic to oxic, deep-sea environments. Cretac Res, 26: 21–32

Wang C, Li X, Liu Z, Li Y, Jansa L, Dai J, Wei Y. 2012. Revision of the Cretaceous-Paleogene stratigraphic framework, facies architecture and provenance of the Xigaze forearc basin along the Yarlung Zangbo suture zone. Gondwana Res, 22: 415–433

Wang C, Feng Z, Zhang L, Huang Y, Cao K, Wang P, Zhao B. 2013. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, northeast China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 385: 17–30

Wang L, Liu C, Fei M, Shen L, Zhang H, Zhao Y. 2015. First SHRIMP U-Pb zircon ages of the potash-bearing Mengyejing Formation, Simao Basin, southwestern Yunnan, China. Cretac Res, 52: 238–250

Wang P J, Mattern F, Didenko N A, Zhu D F, Singer B, Sun X M. 2006. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin. Earth-Sci Rev, 159: 82–102

Wang T, Ramezani J, Wang C, Wu H, He H, Bowring S A. 2016. High-precision U-Pb geochronologic constraints on the Late Cretaceous terrestrial cyclostratigraphy and geomagnetic polarity from the Songliao Basin, Northeast China. Earth Planet Sci Lett, 446: 37–44

Wang Y, Huang C, Sun B, Quan C, Wu J, Lin Z. 2014. Paleo-CO_2 variation trends and the Cretaceous greenhouse climate. Earth-Sci Rev, 129: 136–147

Wang Y Q, Sha J G, Pan Y H, Zhang X L. 2015. Early Cretaceous nonmarine ostracod biostratigraphy of western Liaoning area, NE China. Micropaleotology, 61: 135–145

Willems H, Wan X Q, Yin J R, Dongdui L J, Liu G H, Durr S, Grafe K U. 1995. The Mesozoic development of the N-Indian passive margin and of the Xigaze Forearc Basin in southern Tibet, China. Fach Berichte Fach Geol Un Bremen, 64: 1–113

Willems H, Zhang B G. 1993. Cretaceous and Lower Tertiary sediments of the Tibetan Tethys Himalaya in the area of Gamba (South Tibet, PR Chian). Fach Berichte Fach Geol Un Bremen, 38: 3–27

Wimbledon W. 2017. The Tithonian/Berriasian stage boundary and the base of the Cretaceous System. In: Sames B. ed. 10th International Symposium on the Cretaceous (Abstracts). Vienna: Berichte der Geologischen Bundesanstalt. 290

Wong W H. 1929. The Mesozoic orogenic movement in Eastern China. Bull Geol Soc China, 8: 33–44

Wu H, Zhang S, Jiang G, Hinnov L, Yang T, Li H, Wan X, Wang C. 2013a. Astrochronology of the Early Turonian-Early Campanian terrestrial succession in the Songliao Basin, northeastern China and its implication for long-period behavior of the Solar System. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 385: 55–70

Wu H, Zhang S, Jiang G, Yang T, Guo J, Li H. 2013b. Astrochronology for the Early Cretaceous Jehol Biota in northeastern China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 385: 221–228

Wu H, Zhang S, Hinnov L A, Jiang G, Yang T, Li H, Wan X, Wang C. 2014. Cyclostratigraphy and orbital tuning of the terrestrial upper Santonian-Lower Danian in Songliao Basin, northeastern China. Earth Planet Sci Lett, 407: 82–95

Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 233: 103–119

Xi D, Cao W, Cheng Y, Jiang T, Jia J, Li Y, Wan X. 2016. Late Cretaceous biostratigraphy and sea-level change in the southwest

Tarim Basin. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 441: 516–527

Xi D, Cao W, Huang Q, Do Carmo D A, Li S, Jing X, Tu Y, Jia J, Qu H, Zhao J, Wan X. 2016. Late Cretaceous marine fossils and seawater incursion events in the Songliao Basin, NE China. Cretac Res, 62: 172–182

Xi D, He H, Yu Z, Huang Q, Hu J, Xu Y, Shi Z, Qin Z, Wan X. 2018. New SIMS U-Pb age constraints on the largest lake transgression event in the Songliao Basin, NE China. PLoS ONE, 13: e0199507

Xi D, Li S, Wan X, Jing X, Huang Q, Colin J P, Wang Z, Si W. 2012. Late Cretaceous biostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction based on non-marine ostracodes from well SK1 (south), Songliao Basin, northeast China. Hydrobiologia, 688: 113–123

Xu X, Zheng X, You H. 2010. Exceptional dinosaur fossils show ontogenetic development of early feathers. Nature, 464: 1338–1341

Yin J, Enay R. 2004. Tithonian ammonoid biostratigraphy in eastern Himalayan Tibet. Géobios, 37: 667–686

Zhang F Q, Chen H L, Yu X, Dong C W, Yang S F, Pang Y M, Batt G E. 2011. Early Cretaceous volcanism in the northern Songliao Basin, NE China, and its geodynamic implication. Gondwana Res, 19: 163–176

Zhang L, Wang C, Wignall P B, Kluge T, Wan X, Wang Q, Gao Y. 2018. Deccan volcanism caused coupled $p\mathrm{CO_2}$ and terrestrial temperature rises, and pre-impact extinctions in northern China. Geology, 46: 271–274

Zhang M, Ji L, Du B, Dai S, Hou X. 2016. Palynology of the Early Cretaceous Hanxia Section in the Jiuquan Basin, Northwest China: The discovery of diverse early angiosperm pollen and paleoclimatic significance. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 440: 297–306

Zhang X, Zhang G, Sha J. 2016. Lacustrine sedimentary record of early Aptian carbon cycle perturbation in western Liaoning, China. Cretac Res, 62: 122–129

Zhao J, Wan X Q, Xi D P, Jing X, Li W, Huang Q H, Zhang J Y. 2014. Late Cretaceous palynology and paleoclimate change: Evidence from the SK1 (South) core, Songliao Basin, NE China. Sci China Earth Sci, 57: 2985–2997

Zheng D, Zhang H, Zhang Q, Li S, Wang H, Fang Y, Liu Q, Jarzembowski E A, Yan E, Wang B. 2015. The discovery of an Early Cretaceous dragonfly *Hemeroscopus baissicus* Pritykina, 1977 (Hemeroscopidae) in Jiuquan, Northwest China, and its stratigraphic implications. Cretac Res, 52: 316–322

Zhou Z, Barrett P M, Hilton J. 2003. An exceptionally preserved Lower Cretaceous ecosystem. Nature, 421: 807–814

Zhou Z H. 2006. Evolutional radiation of the Jehol Biota: Chronological and ecological perspectives. Geol J, 41: 377–393

Zhou Z. 2014. The Jehol Biota, an Early Cretaceous terrestrial Lagerstätte: New discoveries and implications. Nat Sci Rev, 1: 543–559

Zhou Z H, Wang Y. 2017. Vertebrate assemblages of the Jurassic Yanliao Biota and the Early Cretaceous Jehol Biota: Comparisons and implications. Palaeoworld, 26: 241–252

Zhu R, Lo C H, Shi R, Pan Y, Shi G, Shao J. 2004. Is there a precursor to the Cretaceous normal superchron? New paleointensity and age determination from Liaoning province, northeastern China. Phys Earth Planet Inter, 147: 117–126

Zhu R, Pan Y, Shi R, Liu Q, Li D. 2007. Palaeomagnetic and $^{40}\mathrm{Ar}/^{39}\mathrm{Ar}$ dating constraints on the age of the Jehol Biota and the duration of deposition of the Sihetun fossil-bearing lake sediments, northeast China. Cretac Res, 28: 171–176

(责任编委: 沈树忠)